

*ANÁLISIS DE LA SUCCIÓN CAPILAR EN  
HORMIGONES: INFLUENCIA DE DISTINTOS  
PARÁMETROS DE ENSAYO*

Valeria Luján Taus

Director: Ángel Di Maio

Tesis presentada para acceder al grado de Magíster en Tecnología y Construcciones de Hormigón. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, U.N.C.P.B.A.

Junio de 2010

## AGRADECIMIENTOS

Quiero dejar expreso agradecimiento a todos aquellos que indirectamente y en forma desinteresada colaboraron con el desarrollo de este trabajo.

En primer lugar agradezco a mi director de Tesis, el Ing. Ángel Di Maio, por sus sugerencias y aportes realizados, por su paciencia y dedicación. Al Ing. Traversa por brindarme a través de las instalaciones del LEMIT el lugar, los medios y materiales necesarios para el desarrollo de las investigaciones.

A todo el personal del LEMIT, desde operarios y técnicos hasta el personal administrativo, por facilitarme las tareas. A mis compañeros, por sus aportes, debates y almuerzos compartidos.

A mis padres, hermana, cuñado y sobrinos, por su apoyo y sostén emocional. A Manuel, por su comprensión y constante estímulo, aún desde la distancia. También a mis amigos, por estar siempre en los momentos importantes.

A todos gracias!

## RESUMEN

La degradación de las estructuras de hormigón armado puede ser consecuencia de patologías de diversa índole, cuyo origen común lo constituye el ingreso de agentes agresivos desde el medio externo, a través de la estructura porosa. Dicho ingreso, está regido predominantemente por algún mecanismo de transporte siendo la absorción capilar uno de los más frecuentes.

El movimiento de agua por capilaridad se presenta habitualmente en las estructuras de hormigón sujetas a ciclos de humedecimiento y secado, y es consecuencia de la acción de fuerzas de adhesión que actúan sobre las paredes de los poros capilares.

Se ha observado que el parámetro que mejor representa el mecanismo por el cual el agua ingresa a través de la estructura porosa del hormigón por efectos capilares, lo constituye la tasa de absorción capilar o sorptivity. La cuantificación de esta propiedad mediante el método gravimétrico, brinda una herramienta útil para calificar a un hormigón desde el punto de vista durable.

El presente trabajo de Tesis plantea como objetivo general, evaluar la influencia de distintos factores sobre el transporte de agua por capilaridad en hormigones de diferentes características tecnológicas elaborados con materiales locales, basándose las experiencias en los lineamientos dispuestos por la reciente norma IRAM 1871. Específicamente se analizó dicho mecanismo de transporte, focalizando el estudio en ciertos factores que podrían influir en la técnica adoptada y consecuentemente en los resultados obtenidos, tales como los vinculados con la geometría de la muestra, con la técnica de ensayo, con las características tecnológicas del hormigón evaluado, los relativos al tratamiento de curado, a las características del hormigón superficial y los vinculados con la metodología de análisis de datos.

## *Resumen*

En base a los resultados obtenidos se observó que la gran mayoría de las variables analizadas afectan las determinaciones experimentales del ensayo de absorción de agua por capilaridad, por cuanto deben ser tenidas en cuenta al analizar los parámetros obtenidos. Asimismo, la sensibilidad de la técnica a las condiciones de ejecución obliga al cumplimiento estricto de la metodología de ensayo, debiéndose considerar cualquier modificación implementada en la misma.

## ABSTRACT

The degradation of reinforced concrete structures can be a consequence of several pathologies, which are originated by the ingress of aggressive external agents through the pore structure. This ingress is predominantly ruled by a certain transport mechanisms, being the capillary absorption one of the most common.

The movement of capillary water is most frequently exhibited by the concrete structures submitted to wetting and drying, and it is a consequence of the adhesion forces acting on the walls of the capillary pores.

As it was observed, the parameter that better represents the mechanism by means of which water ingress through the pore structure of concrete by capillarity is the capillary absorption rate or sorptivity. The estimation and quantification of this property by the gravimetric method, is a useful tool for qualifying a concrete from the durable point of view.

This Thesis has as general objective the evaluation of the influence of different factors on the transport of capillary water, in concrete mixes, elaborated with local materials, with different technological characteristics, on the basis of experiences in accordance with the guidelines from the recent IRAM 1871 standard. This transport mechanism was specifically analysed, focusing the study on some factors that may influence on the technique and consequently on the obtained results, such as those linked to the sample geometry characteristics, the test technique, the concrete technological properties, the curing conditions, the concrete superficial characteristics and methodology for data analysis.

On the basis of the obtained results, it was observed that most of the analysed variables influence on the experimental determinations of the water sorptivity test, therefore these variables must be taken into account when analysing

*Abstract*

the obtained parameters. Likewise, the sensitivity of the technique to the performing conditions requires the strict compliance of the test methodology, also taking into account any modification implemented in the technique itself.

## ÍNDICE

Agradecimientos.....	i
Resumen.....	ii
Abstract.....	iv
Índice.....	vi
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tablas.....	xiv

### **Capítulo 1: Introducción**

1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos y alcances.....	7

### **Capítulo 2: Antecedentes sobre el Ensayo de Absorción de Agua por Capilaridad**

2.1. Introducción.....	9
2.2. La estructura porosa del hormigón. Origen de los poros capilares, vacíos y agua en la pasta de cemento hidratada.....	10
2.3. El fenómeno de la Succión Capilar.....	14
2.3.1. Origen de la Tensión Superficial.....	14
2.3.2. Mojado - Ángulo de contacto.....	17
2.3.3. Capilaridad - Ley de Jurín.....	19
2.4. Técnicas de evaluación.....	23
2.5. Cuantificación de la succión capilar.....	28
2.6. Influencia de distintos factores sobre la succión capilar.....	37
2.6.1. Influencia de los parámetros de la muestra y pre- acondicionamiento.....	37
2.6.1.1. Tamaño de la muestra.....	37
2.6.1.2. Ubicación de la muestra.....	38
2.6.1.3. Sellado lateral.....	40

2.6.1.4. Secado - Contenido inicial de humedad.....	41
2.6.2. Influencia de las condiciones medioambientales y de ensayo .....	44
2.6.2.1. Temperatura.....	44
2.6.2.2. Superficie de apoyo .....	45
2.6.2.3. Líquido de ensayo .....	45
2.6.2.4. Edad de ensayo.....	47
2.6.2.5. Curado.....	49
2.6.3. Influencia de las características composicionales del hormigón .....	53
2.6.3.1. Razón a/c - Contenido unitario de agua y cemento.....	53
2.6.3.2. Tipos de cemento - Adiciones .....	55
2.6.3.3. Aditivos.....	59
2.6.3.4. Tipos de agregados.....	59

### **Capítulo 3: El Método Gravimétrico directo**

3.1. Introducción .....	60
3.2. Modelización del movimiento de agua por capilaridad - Fundamento del método .....	61

### **Capítulo 4: Análisis Comparativo de Normas que Regulan el Ensayo de Absorción de Agua por Capilaridad**

4.1. Introducción .....	69
4.2. Análisis y discusión de las propuestas.....	70
4.2.1. Objetivo.....	71
4.2.2. Sector a ensayar.....	71
4.2.3. Forma, tamaño y dimensiones de la muestra .....	72
4.2.4. Instrumental.....	73
4.2.5. Pre-acondicionamiento .....	76
4.2.6. Procedimiento.....	79
4.2.7. Cálculo .....	81

**Capítulo 5: Desarrollo Experimental**

5.1. Programa experimental.....	87
5.1.1. Materiales y mezclas evaluadas.....	87
5.1.2. Mezclado, compactación y curado.....	89
5.1.3. Propiedades de los hormigones.....	91
5.1.3.1. Estado fresco.....	91
5.1.3.2. Estado endurecido.....	93
5.1.3.2.1. Absorción, densidad y porosidad.....	93
5.1.3.2.2. Resistencia a compresión.....	95
5.2. Metodología utilizada en el ensayo de succión capilar.....	97
5.2.1. Muestras.....	97
5.2.2. Pre-acondicionamiento.....	98
5.2.3. Ensayo.....	101
5.2.4. Metodología de cálculo - Determinación de los parámetros de ensayo.....	103
5.3. Resultados y análisis.....	104
5.3.1. Factores relativos a las características de la muestra.....	105
5.3.1.1. Forma de la muestra.....	105
5.3.1.2. Ubicación de la muestra.....	107
5.3.1.3. Superficie de afluencia.....	113
5.3.1.4. Probeta / Testigo.....	115
5.3.2. Factores relativos a la técnica de ensayo.....	117
5.3.2.1. Nivel de agua.....	117
5.3.2.2. Temperatura de secado.....	119
5.3.3. Factores relativos a las características tecnológicas del hormigón evaluado.....	121
5.3.3.1. Razón a/c.....	121
5.3.3.2. Tipos de cemento.....	123
5.3.3.3. Tipos de agregados gruesos.....	126
5.3.3.3.1. Agregados gruesos naturales.....	126
5.3.3.3.2. Agregados gruesos reciclados.....	129

5.3.3.4. Tamaño máximo del agregado grueso .....	131
5.3.3.5. Aire intencionalmente incorporado .....	133
5.3.4. Factores relativos al tratamiento de curado .....	135
5.3.4.1. Tipo de curado .....	135
5.3.4.2. Duración del curado .....	139
5.3.5. Factores relativos a las características del hormigón superficial .....	142
5.3.5.1. Aditivo desencofrante .....	142
5.3.5.2. Carbonatación.....	147
5.3.6. Factores relativos a la metodología de análisis de datos.....	151
5.3.6.1. Porcentaje de cálculo.....	151
5.3.6.2. IRAM / ASTM.....	153

## Capítulo 6: Conclusiones

6.1. Conclusiones .....	157
6.1.1. Tratamiento de curado .....	157
6.1.2. Características tecnológicas del hormigón .....	158
6.1.3. Características del hormigón superficial.....	160
6.1.4. Metodología de ensayo .....	160
6.1.5. Características de la muestra.....	161
6.1.6. Metodología de análisis de datos .....	162
6.2. Estudios futuros .....	162

## Capítulo 7: Referencias

7.1 Referencias.....	164
----------------------	-----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Modelo del C-S-H.....	13
Figura 2.2: Polaridad de la molécula de agua.....	14
Figura 2.3: Fuerzas intermoleculares actuantes sobre una molécula de agua de acuerdo a su ubicación relativa respecto de la interfase líquido-gas: (a) alejada de la interfase, (b) cerca de la interfase y (c) sobre la interfase.....	15
Figura 2.4: Fuerzas actuantes sobre una molécula ubicada sobre la interfase líquido-gas.....	17
Figura 2.5: Fuerzas actuantes sobre una molécula ubicada sobre la interfase líquido-gas en las cercanías de un cuerpo sólido.....	18
Figura 2.6: Fuerzas intermoleculares actuantes sobre una molécula ubicada en la proximidad de un cuerpo sólido, de un líquido (a) que moja la superficie y (b) que no moja la superficie.....	19
Figura 2.7: Fuerzas actuantes sobre la columna líquida de un tubo capilar.....	20
Figura 2.8: Esquema del ensayo de succión capilar.....	24
Figura 2.9: Esquema del ensayo ISAT.....	25
Figura 2.10: Esquema del ensayo Autoclam.....	26
Figura 2.11: Esquema del ensayo Standpipe.....	26
Figura 2.12: Esquema del ensayo Figg.....	27
Figura 2.13: Esquema del ensayo Covercrete.....	28
Figura 2.14: Configuraciones de absorción de agua: (a) horizontal, (b) por infiltración y (c) por ascenso capilar.....	29
Figura 2.15: Gráfico del incremento de masa en función de la raíz cuadrada del tiempo.....	31
Figura 2.16: Modelo del gráfico de succión capilar.....	35

Figura 2.17: Influencia de la profundidad de la muestra ensayada sobre hormigones (a) patrones, (b) con 22% de ceniza volante y (c) con 9% de humo de sílice .....	39
Figura 2.18: Influencia del sellado de las muestras y del cubrimiento del recipiente .....	41
Figura 2.19: Influencia del pre-acondicionamiento de las muestras .....	44
Figura 2.20: Influencia del líquido de ensayo .....	46
Figura 2.21: Influencia del tipo de curado sobre la succión capilar .....	50
Figura 2.22: Influencia de la humedad relativa y temperatura ambiente sobre la absorción inicial de hormigones elaborados con filler calcáreo (a) 25% y (b) 12% .....	52
Figura 2.23: Influencia de la razón a/c sobre la succión capilar.....	54
Figura 4.1: Muestras de ensayo: (a) probeta y (b) testigos.....	72
Figura 4.2: Esquema del cálculo de las velocidades de absorción inicial y secundaria de acuerdo a la norma ASTM C 1585 .....	82
Figura 4.3: Esquema del cálculo de la velocidad de succión capilar según la norma IRAM 1871 .....	83
Figura 5.1: Extracción de la muestra: (a) ubicación en la probeta y (b) aserrado.....	98
Figura 5.2: Medición del diámetro de las muestras de ensayo .....	99
Figura 5.3: Pre-acondicionamiento de las muestras (a) impermeabilización, (b) saturación, (c) secado y (d) embalaje .....	100
Figura 5.4: Disposición de las muestras durante el ensayo .....	102
Figura 5.5: Metodología de ensayo: (a) secado superficial y (b) pesaje.....	103
Figura 5.6: Muestras de diferente sección transversal: (a) circular, (b) cuadrada y (c) rectangular .....	106
Figura 5.7: Influencia de la forma de la muestra sobre la succión capilar del hormigón H-1 curado bajo distintos regímenes .....	107
Figura 5.8: Ubicación de las muestras de ensayo en la probeta.....	109

Figura 5.9: Influencia de la ubicación de la muestra sobre la succión capilar del hormigón H-2 curado bajo diferentes regímenes .....	109
Figura 5.10: Ubicación de las muestras en la probeta .....	111
Figura 5.11: Influencia de la ubicación de la muestra sobre la succión capilar de los hormigones H-3, H-4 y H-5 .....	112
Figura 5.12: Influencia del área de ensayo sobre la succión capilar del hormigón H-7.....	114
Figura 5.13: Influencia del tipo de muestra sobre la succión capilar del hormigón H-7.....	116
Figura 5.14: Influencia del nivel de agua sobre la succión capilar de los hormigones H-6 y H-7 .....	118
Figura 5.15: Influencia de la temperatura de secado sobre la succión capilar de los hormigones H-6 y H-7 .....	120
Figura 5.16: Influencia de la razón a/c sobre la velocidad de succión capilar.....	122
Figura 5.17: Influencia de la razón a/c sobre la capacidad de succión capilar.....	123
Figura 5.18: Influencia del tipo de cemento sobre la succión capilar de los hormigones H-10, H-11 y H-12 .....	125
Figura 5.19: Influencia del tipo agregado grueso sobre la succión capilar de los hormigones H-13 a H-20 .....	127
Figura 5.20: Influencia del empleo de agregados gruesos reciclados sobre la succión capilar de los hormigones H-21 a H-24.....	130
Figura 5.21: Influencia del tamaño máximo del agregado grueso sobre la succión capilar de los hormigones H-8, H-9, H-26 y H-27 .....	132
Figura 5.22: Influencia de la incorporación intencional de aire sobre la succión capilar de los hormigones H-28 y H-29.....	134
Figura 5.23: Influencia del tipo de curado sobre la succión capilar de los hormigones H-8 y H-9.....	137
Figura 5.24: Influencia del tipo de curado sobre la succión capilar de los hormigones H-1 y H-2.....	138

Figura 5.25: Influencia de la duración del curado húmedo sobre la succión capilar de los hormigones H-23, H-24 y H-25.....	140
Figura 5.26: Moldes empleados y calado de testigos: (a) dimensiones del molde e identificación de las caras con y sin aditivo, (b) ubicación de los testigos y (c) identificación de las muestras en el testigo.....	144
Figura 5.27: Influencia de la aplicación de aditivo desencofrante sobre la succión capilar de los hormigones H-30 y H-31 .....	145
Figura 5.28: Fotomicrografías del hormigón H-31 correspondientes a muestras en contacto con el molde (a) con aditivo y (b) sin aditivo.....	147
Figura 5.29: Fotomicrografías de muestras carbonatadas del hormigón (a) H-17 y (b) H-18 .....	149
Figura 5.30: Influencia de la carbonatación superficial sobre la succión capilar de muestras de 40 mm de espesor correspondientes a los hormigones H-17 y H-18.....	150
Figura 5.31: Influencia de los porcentajes límites adoptados para el secado y cálculo sobre la succión capilar del hormigón H-28 .....	152
Figura 5.32: Determinación de los parámetros de succión capilar de los hormigones H-28 y H-29 según norma IRAM 1871.....	154
Figura 5.33: Determinación de las velocidades de absorción capilar de los hormigones H-28 y H-29 según norma ASTM C 1585 .....	154

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Valores de tensión superficial de diferentes líquidos .....	16
Tabla 2.2: Valores típicos de S en hormigones de distinta razón a/c .....	31
Tabla 2.3: Tasa de succión capilar de hormigones elaborados con cementos binarios y ternarios .....	58
Tabla 4.1: Cuadro comparativo de los documentos analizados .....	85
Tabla 5.1: Análisis físico-químico de los cementos utilizados .....	87
Tabla 5.2: Absorción en 24 h y densidad saturada y superficie seca de los agregados .....	88
Tabla 5.3: Proporciones de las mezclas en estudio.....	89
Tabla 5.4: Tratamiento de curado de los hormigones evaluados.....	91
Tabla 5.5: Propiedades en estado fresco de las mezclas en estudio .....	92
Tabla 5.6: Absorción, densidad y porosidad de los hormigones en estudio .....	94
Tabla 5.7: Resistencia a compresión promedio de los hormigones en estudio .....	96
Tabla 5.8: Parámetros de succión capilar correspondientes al hormigón H-1.....	107
Tabla 5.9: Parámetros de succión capilar correspondientes al hormigón H-2.....	110
Tabla 5.10: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-3, H-4 y H-5.....	112
Tabla 5.11: Parámetros de succión capilar correspondiente al hormigón H-7 (d=100 y 150 mm).....	114
Tabla 5.12: Parámetros de succión capilar correspondientes al hormigón H-7 (probeta/testigo).....	116
Tabla 5.13: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-6 y H-7 (nivel de agua: 2 y 4 mm).....	118

Tabla 5.14: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-6 y H-7 (temperatura de secado: 50 y 75°C) .....	120
Tabla 5.15: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-10, H-11 y H-12 .....	125
Tabla 5.16: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-13 a H-20.....	128
Tabla 5.17: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-21 a H-24.....	131
Tabla 5.18: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-8, H-9, H-26 y H-27 .....	133
Tabla 5.19: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-28 y H-29.....	135
Tabla 5.20: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-8 y H-9 (diferentes condiciones de curado).....	137
Tabla 5.21: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-1 y H-2 (diferentes condiciones de curado).....	138
Tabla 5.22: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-23, H-24 y H-25 (diferente duración del curado húmedo).....	140
Tabla 5.23: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-30 y H-31 .....	145
Tabla 5.24: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-17 y H-18.....	150
Tabla 5.25: Parámetros de succión capilar correspondientes al hormigón H-28.....	152
Tabla 5.26: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-28 y H-29, según normas IRAM y ASTM.....	155

# Capítulo 1

---

## *Introducción*

## **1.1. Introducción**

El hormigón armado ocupa un lugar destacado en la industria de la construcción y constituye uno de los materiales mundialmente más utilizados con fines estructurales. Este material se caracteriza por su bajo costo, relativa facilidad constructiva, disponibilidad de materias primas y un adecuado comportamiento resistente.

No obstante ello, sus características funcionales, estéticas y/o resistentes, pueden verse comprometidas en el tiempo, debido al deterioro progresivo consecuencia del envejecimiento natural al que está sujeto. Sumado a este proceso inevitable, la consecución de la vida útil de una determinada estructura, puede verse notoriamente afectada debido a distintas patologías directamente asociadas a su interacción con el medio externo.

Décadas atrás, en los comienzos de la utilización de este material en la construcción de estructuras, el proyecto se regía exclusivamente por requerimientos resistentes y el desempeño de la estructura resultaba satisfactorio. Lo anterior se debía fundamentalmente a la adopción de diseños robustos, con secciones sobredimensionadas y recubrimientos de gran espesor, sumado a criterios tecnológicos que involucraban contenidos de cementos irrazonablemente elevados.

En lo sucesivo, con el progresivo desarrollo en el conocimiento tecnológico y el continuo avance en las técnicas constructivas, los diseños antiguos fueron poco a poco reemplazados por estructuras modernas, más esbeltas, versátiles y económicas, sumado a la aparición de nuevos materiales como el caso de los aditivos y adiciones y a los cambios en la constitución y finura de los cementos.

Esta tendencia en el diseño tecnológico culminó en la extrema optimización de las formas constructivas y de los materiales utilizados, evidenciado por la presencia de estructuras con espesores de recubrimiento inferiores al mínimo

compatible con las condiciones de emplazamiento, por el empleo de contenidos mínimos de cemento y por la aplicación de inadecuados diseños tecnológicos, entre otros.

Esta transgresión constructiva, consecuencia de un manejo inadecuado de la innovación tecnológica, tuvo finalmente sus consecuencias, manifestadas por la aparición de estructuras afectadas por diferentes patologías, a pesar de haber sido ejecutadas cumpliendo los requisitos resistentes exigidos en las respectivas reglamentaciones.

Dicha problemática, condujo al desarrollo de una visión más amplia en la concepción de las estructuras de hormigón armado, con el objetivo de concebir estructuras que correctamente proyectadas y construidas mantuvieran una adecuada serviciabilidad durante su vida útil.

Se asimiló de este modo, el concepto de *durabilidad*, comprendiéndose que no siempre existe una vinculación lógica entre esta propiedad y la resistencia. Si bien esta última cuantifica la capacidad de un material para resistir la acción de fuerzas externas, su análisis es de tipo volumétrico e involucra a todo el elemento estructural evaluado. Sin embargo, la evaluación de una estructura desde el punto de vista durable, comprende el estudio del hormigón superficial y su relación con los distintos mecanismos de transporte causales de distintas patologías.

La continua evolución en los diseños tendientes a la obtención de estructuras durables, se vio reflejada en los reglamentos y códigos de seguridad estructural, donde los requerimientos relativos a la durabilidad y vida en servicio de las estructuras de hormigón comenzaron a cobrar una importancia significativa. Esta paulatina evolución en la concepción de estructuras durables reflejaba una clara tendencia a lo que hoy se llama el *diseño por durabilidad*.

Los procesos de degradación más frecuentes que puede sufrir el hormigón, están en la gran mayoría de los casos vinculados al ingreso, desde el medio externo, de líquidos y sustancias agresivas a través de la estructura porosa. Dicho ingreso se produce por distintos mecanismos de transporte y su circulación a través de la red de capilares puede conducir el movimiento de otras sustancias como sales en disolución o solventes inorgánicos.

Con el fin de asegurar un adecuado comportamiento de las estructuras de hormigón frente a un determinado medio ambiente, surge la necesidad de estudiar cada mecanismo de transporte en particular, con el objeto de establecer mediante la aplicación de técnicas de ensayo, parámetros que posibiliten cuantificar y calificar cada fenómeno. Este hecho conducirá a la obtención de modelos de degradación que permitan estimar la vida útil de estructuras nuevas y en el caso de las construidas, durante la etapa de mantenimiento, para actualizar los pronósticos de la vida útil remante.

Basado en estos aspectos, el diseño por durabilidad contempla parámetros que caracterizan cada mecanismo de transporte tales como la permeabilidad al agua y al oxígeno, el coeficiente de difusión y la absorción de agua por capilaridad, entre otros.

Durante años se utilizó a la permeabilidad como parámetro de caracterización de la calidad de un determinado hormigón desde el punto de vista durable. Sin embargo, sólo algunas estructuras están sometidas en condiciones reales de exposición, a un gradiente de presiones hidrostáticas. Así, construcciones como las edificaciones, en las cuales el ingreso de líquidos se produce comúnmente por capilaridad, deberían caracterizarse a través de parámetros que específicamente representaran dicho fenómeno.

La absorción de agua por inmersión total, constituye un indicador del volumen de poros abiertos y aún se emplea como parámetro de caracterización.

Sin embargo, dicho parámetro no refleja la disposición de la estructura porosa, en lo que se refiere al tamaño y distribución de poros, y menos aún la velocidad a la cual el líquido ingresa por la estructura porosa del hormigón. Así, hormigones de igual porosidad y/o absorción, pueden exhibir diferentes velocidades de absorción de agua por capilaridad, dependiendo de su estructura capilar. De este modo, una matriz con una estructura de poros muy finos presentará una mayor velocidad de ascenso capilar que otra de similares características tecnológicas, pero con una estructura porosa más gruesa.

De los mecanismos de transporte mencionados, la absorción de agua por capilaridad, constituye la propiedad que mejor refleja el mecanismo por el cual el agua y los agentes agresivos penetran en la estructura porosa del material, la cual habitualmente se presenta en aquellas estructuras en las que el hormigón se encuentra sujeto a ciclos alternados de humedecimiento y secado, siendo responsable en muchos casos de severas patologías.

Dicho mecanismo de transporte consiste en el ascenso de un líquido, generalmente agua, a través de la estructura porosa del hormigón, consecuencia de la acción de fuerzas capilares. Se trata de un fenómeno frecuente cuya cuantificación otorga un parámetro de caracterización del hormigón desde el punto de vista durable, resultando factible su evaluación en términos prácticos, debido a que no requiere de equipamientos costosos ni sofisticados, a diferencia del resto de los fenómenos de transporte mencionados.

En el ámbito internacional se suele denominar a la propiedad asociada al ingreso de un líquido por tensión superficial, a través de un medio poroso como *sorptivity*, la cual se traduciría acertadamente como *sorptividad*. Si bien esta última terminología no es comúnmente utilizada, cuando se hace alusión a dicha propiedad directamente se la refiere como *absorción* o *succión capilar*, o llanamente *capilaridad*. Los parámetros que se utilizan para identificar a dicho

fenómeno dependen de la normativa aplicada para su cuantificación, como será tratado en detalle en los sucesivos capítulos.

Mediante la aplicación de distintas técnicas de ensayo, pueden evaluarse en forma aislada los diferentes mecanismos de transporte a los que pueden estar sometidas las estructuras en condiciones reales de servicio. Un sólo parámetro individual brinda una información incompleta y no es determinante en la evaluación de la calidad y durabilidad de un determinado hormigón, ya que habitualmente en las estructuras en servicio, tales fenómenos se superponen y actúan en forma conjunta.

Sin embargo se requiere en principio, la evaluación de cada uno de los parámetros de transporte factibles de producirse en la estructura en estudio bajo las condiciones particulares de emplazamiento, para luego efectuar el análisis y estudio de todos los parámetros representativos de las diferentes propiedades del hormigón en forma integral, realizándose una investigación conjunta e interactiva entre los mismos.

Respecto al mecanismo de transporte por succión capilar, las primeras investigaciones datan de la segunda mitad de la década del 50' y son atribuidas a Philip, cuyos estudios fueron originalmente desarrollados para su aplicación en la Física de Suelos y en la Hidrología (Hall y Hoff, 2002).

Recién algunos años después, a fines de los 70' y principios de los 80', dicha teoría fue implementada a los materiales de construcción porosos, como ladrillos de arcilla, rocas, y morteros, siendo Hall y Gummerson los principales referentes. Sin embargo, el gran impacto en la investigación sobre materiales cementíceos se dio a mediados de la década del 80' con las publicaciones de Ho y Lewis (Hall, 1989).

Con el progresivo y continuo avance en el diseño de obras basado en aspectos durables, la temática continuó siendo estudiada. Así poco a poco a nivel internacional fueron apareciendo documentos que reglamentaban el ensayo de absorción de agua por capilaridad. En aquellos países en los que no se disponía de normas que regularan el ensayo la temática continuó siendo estudiada con miras a la obtención de una metodología práctica y reproducible, basada en reglas o criterios mínimos operativos adecuadamente desarrollados que permitiera cuantificar el movimiento de agua por capilaridad, y obtener de este modo un parámetro de caracterización del hormigón. De allí la importancia de la normalización para la validación de técnicas que avalen la confiabilidad de las prácticas de ensayo.

A nivel nacional hasta hace algunos años el ensayo de succión capilar no se encontraba reglamentado, por lo cual había una gran diversidad de técnicas en simultánea aplicación, cada una de ellas basada en alguna norma internacional, incluso con ciertas variantes implementadas de acuerdo a la experiencia y buen juicio del operador. Ante esta circunstancia, la temática comenzó a tratarse para ser normalizada por el IRAM y a fines de 2004 se aprobó la norma *IRAM 1871: "Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido"*, actualmente en vigencia y sobre la cual se hace mención en el Proyecto de Reglamento CIRSOC 201: 2005, impuesto como uno de los requisitos a cumplir por aquellos hormigones destinados a estructuras en contacto con el medio externo.

Si bien hoy existe una vasta experiencia internacional que informa valores de los parámetros de succión capilar en hormigones de diferente nivel resistente, cada una de ellas se halla referida a una norma determinada, llevada a cabo bajo condiciones particulares y específicas de ensayo y sobre hormigones elaborados con materiales que difieren, en muchos casos, sustancialmente de los que habitualmente se utilizan en Argentina, resultando por lo tanto muy difícil establecer comparaciones o extrapolar los resultados a este contexto de trabajo.

## **1.2. Objetivos y alcances**

Sobre la base de lo expuesto, el objetivo general de la Tesis consiste en el análisis del ensayo de absorción de agua por capilaridad en hormigones, focalizando el estudio en los factores considerados como más relevantes en cuanto a su posible afectación sobre los parámetros obtenidos. Se analiza la influencia de aspectos vinculados con las características medioambientales, tecnológicas y geométricas de las muestras, con la historia de curado y pre-acondicionamiento, con la metodología de ensayo, cálculo y análisis de datos.

Entre los objetivos particulares debe mencionarse el estudio de la influencia de parámetros tecnológicos como la razón a/c, el tipo y tamaño máximo del agregado grueso, tipos de cemento y el efecto de la incorporación intencional de aire sobre la respuesta del hormigón frente al transporte de agua por capilaridad. Además, se analiza el comportamiento de muestras extraídas de hormigones en contacto con encofrados a los cuales se les aplicó un aditivo desencofrante, como así también el efecto de la carbonatación presente en la muestra previo a la realización del ensayo.

Otras variables evaluadas están relacionadas con la posible incidencia de la geometría (a igualdad de áreas de ensayo), de la superficie de afluencia (para igual forma geométrica), de la ubicación de la muestra en la probeta, y las posibles discrepancias obtenidas al ensayar muestras pertenecientes a testigos calados y a probetas moldeadas.

Por su importancia con el nivel de hidratación del cemento y su estrecha relación con la desconexión del sistema de poros capilares, la duración y condición de curado, constituyen variables de estudio obligadas.

Respecto a los factores relativos a la metodología de ensayo, se analiza la profundidad de inmersión de la cara de la muestra en contacto con el líquido y la

temperatura de secado aplicada durante el pre-acondicionamiento. Por otro lado, se estudia la condición a partir de la cual se considera finalizado el ensayo, y se analizan comparativamente los parámetros de succión capilar obtenidos al seguir las metodologías de cálculo propuestas por las normas IRAM 1871 y ASTM C 1585.

Como será tratado en el *Capítulo 2*, algunos de los factores analizados fueron evaluados previamente por otros investigadores, dejando en muchos casos cierto nivel de incertidumbre debido a las divergentes conclusiones encontradas. Esto último se encuentra asociado fundamentalmente a la técnica de ensayo adoptada para cuantificar el fenómeno y a las características específicas de los materiales empleados. Por ello es preciso indicar que todos los estudios desarrollados en este trabajo, fueron realizados con hormigones elaborados con materiales locales, basándose la técnica en la metodología seguida por la norma IRAM 1871.

Por todo lo expuesto y por constituirse la referida técnica en un ensayo relativamente reciente del que se dispone poca experiencia en Argentina, se pretende mediante esta Tesis, brindar nuevos datos a fin de realizar un aporte al conocimiento en materia de normalización, propiciando de este modo la obtención de parámetros confiables de caracterización del fenómeno en cuestión. Lo anteriormente expuesto, tiene como fin último asistir a la obtención de obras más durables y con una mejor prestación de servicio, contribuyendo de esta manera al diseño de obras por durabilidad y consecuentemente al desarrollo económico y social.

## Capítulo 2

---

*Antecedentes sobre el Ensayo de  
Absorción de Agua por Capilaridad*

## **2.1. Introducción**

Como fuera comentado en el capítulo anterior, la estructura de poros del hormigón constituye la vía de acceso de las sustancias agresivas provenientes del medio exterior. De su magnitud y morfología dependerá la vulnerabilidad del hormigón ante los diversos agentes externos. Parámetros como la distribución del tamaño de poros y su conectividad juegan un rol fundamental en las propiedades de transporte y consecuentemente en la durabilidad de las estructuras de hormigón armado.

Particularmente el ascenso de un líquido por capilaridad en materiales porosos, es la consecuencia de la acción de fuerzas capilares actuando sobre la estructura porosa del sólido. En el caso del hormigón, el líquido (generalmente agua) asciende contrarrestando la fuerza de la gravedad. Este ascenso se debe a que las fuerzas de adhesión agua-hormigón resultan mayores que las de cohesión agua-agua, por lo que el agua contenida en el capilar sube hasta que las fuerzas de atracción se igualan al peso de la columna de agua formada en su ascenso.

Respecto a la cuantificación de dicho mecanismo de transporte, se han encontrado resultados divergentes que no conducen a una unificación de criterios, consecuencia de la variabilidad en las diferentes prácticas de ensayo y en las características tecnológicas del material evaluado. Por otro lado, existen algunas cuestiones relativas a las condiciones de ejecución y análisis de datos que requieren de un estudio aún más profundo.

En este capítulo se desarrolla un estado del arte acerca del ensayo de succión capilar y algunos conceptos asociados. Se exponen resumidamente ciertos aspectos inherentes a la estructura porosa del hormigón, como los tipos de poros y el agua existente en el sistema. Además se presentan los principios físicos que regulan el fenómeno y las técnicas de evaluación y cálculo existentes, con los principales referentes que trabajaron en el tema. Finalmente, se presenta una

recopilación de la influencia de distintos parámetros tecnológicos y medioambientales sobre el mecanismo de transporte por succión capilar.

## 2.2. La estructura porosa del hormigón. Origen de los poros capilares, vacíos y agua en la pasta de cemento hidratada

El hormigón es un material compuesto constituido por una fase sólida (cemento hidratado, cemento anhidro y agregados) y un espacio poroso o volumen de vacíos, que representan entre el 8 y el 25% del volumen total.

Desde el instante inicial del contacto entre el agua y el cemento comienza una gran actividad química, caracterizada por la disolución de los compuestos en sus constituyentes iónicos, con una posterior saturación y precipitación de los hidratos en disolución. Se forman así los llamados “productos de hidratación”, entre los cuales el C-S-H (silicato de calcio hidratado) y el CH (hidróxido de calcio) constituyen los compuestos más importantes. Los primeros ocupan entre el 50 y el 60% del volumen de la pasta, mientras que los segundos entre el 20 y el 25%.

El continuo crecimiento de dichos productos produce el llenado de los espacios vacíos inicialmente ocupados por agua y por las partículas de cemento en disolución, tendiendo a la formación de una matriz continua. De este modo la pasta de cemento se convierte progresivamente de un fluido viscoso a un sólido poroso, donde los huecos no ocupados por los componentes sólidos de hidratación constituyen los llamados *poros capilares*.

El término capilar proviene del latín *capillaris*, de *capillus*, cabello o tubo de diámetro pequeño. Por analogía en el caso del hormigón, a los pequeños poros conectados entre sí y con el exterior de diámetros comprendidos entre 10 nm y 10  $\mu\text{m}$  se los denomina poros capilares. Estos poros se hallan distribuidos aleatoriamente y existen en una cantidad muy variable, pudiendo alcanzar el 35%

del volumen de la pasta. La cantidad presente dependerá fundamentalmente de la razón a/c y del grado de hidratación alcanzado, el cual se halla directamente relacionado con las condiciones de curado. Los poros capilares afectan propiedades tales como la resistencia, permeabilidad y contracción de la pasta.

Otro tipo de poros presente en la pasta son los que forman parte de la constitución intrínseca del C-S-H, llamados *poros del gel*. Su tamaño oscila entre 0,5 y 10 nm, correspondiendo los menores tamaños al espacio entre capas y los mayores a los llamados poros pequeños y microporos. Ocupan aproximadamente el 26% del volumen aparente de los productos de hidratación, no intervienen en los mecanismos de transporte por ser parte de la estructura del C-S-H, pero afectan propiedades tales como la contracción por secado y el creep.

También los agregados presentan poros de diámetros variables, en general del orden de los poros capilares de mayor tamaño, aunque dependen de su génesis y de las características mineralógicas particulares. A pesar de que los agregados representan alrededor del 75% del volumen del hormigón, es de destacar que la porosidad de los agregados naturales habitualmente empleados en la elaboración de hormigones, se encuentra por debajo del 3%.

En el hormigón también existen vacíos debidos a la incorporación de aire ya sea en forma natural o intencional. En el caso del *aire naturalmente incorporado*, puede tener su origen en estado plástico debido al fenómeno de exudación, por medio del cual se generan canales capilares constituyendo una gran red de poros interconectados. Durante este fenómeno, el ascenso del agua puede interrumpirse por la presencia de algún agregado grueso de gran tamaño y permanecer debajo de éste último, evaporándose luego al secarse el hormigón. De esta manera aparecen oquedades debajo de los agregados que constituyen zonas de debilidad desde el punto de vista resistente y durable.

Sumado a lo anterior, el ingreso de aire a la masa del hormigón puede producirse durante el mezclado, debido a una operación excesivamente vigorosa, lo cual genera la formación de poros dispuestos en forma arbitraria, de tamaños cercanos al centímetro, pudiendo alcanzar en casos extremos hasta el 3% del volumen de la mezcla. También durante las operaciones de compactación además de quedar aire atrapado, pueden generarse vacíos o defectos superficiales y los llamados “nidos de abeja”. La existencia de estos tipos de vacíos representa una vía de acceso directa para los agentes provenientes del medio externo.

Los huecos generados mediante la *incorporación intencional de aire*, consisten en numerosos vacíos microscópicos de forma esferoidal uniformemente distribuidos en la masa del hormigón, de diámetros comprendidos entre 10 y 200  $\mu\text{m}$ . Su volumen puede llegar hasta el 8% aproximadamente, dependiendo de la cantidad y el tipo de agente incorporador empleado. Desde el punto de vista de la durabilidad, constituye una excelente solución ya que el aumento en la sección transversal de los capilares por la interrupción de las burbujas de aire, disminuye la presión capilar y consecuentemente reduce el ascenso del líquido por capilaridad.

En la pasta de cemento hidratada además existe agua, la cual puede clasificarse según la facilidad con la que puede ser removida del sistema. La Fig. 2.1 presenta un esquema del modelo del C-S-H y del agua asociada a su estructura, propuesto por Feldman y Sereda (1968). El *agua químicamente combinada* o *agua no evaporable*, es la que forma parte de la estructura de los compuestos hidratados, no es posible extraerla por un simple secado, sino que sólo puede ser removida al descomponerse el compuesto mediante calentamiento.

El *agua intercapa* es el agua contenida entre las capas del C-S-H, también llamada *agua del gel*, consiste en moléculas de agua físicamente retenidas por fuerzas de atracción a la estructura superficial del sólido. Es factible su eliminación con un fuerte secado a una humedad relativa del 30%. La pérdida del agua adsorbida es el principal responsable de la contracción por secado de la pasta.

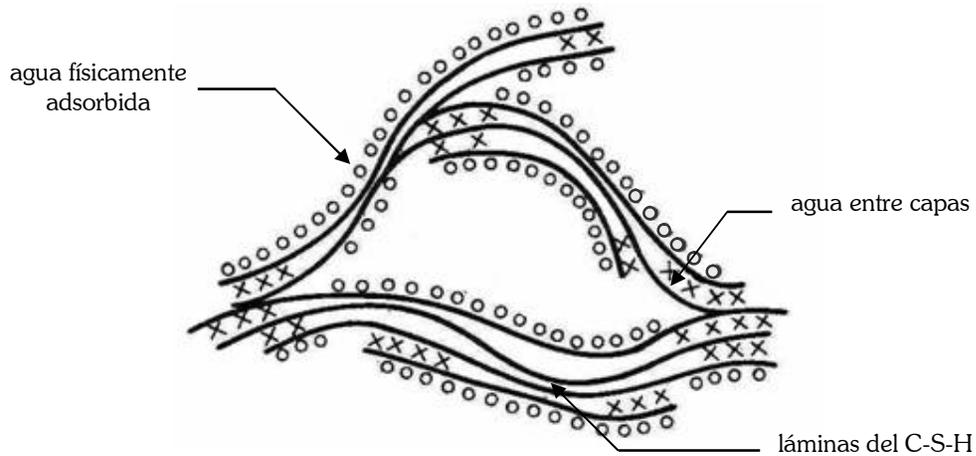


Figura 2.1: Modelo del C-S-H (adaptado de Feldman y Sereda, 1968).

En la pasta de cemento también existe *agua libre*, la cual se encuentra sin la influencia de las fuerzas atractivas de la superficie del sólido. Se halla presente en los vacíos capilares, de allí que también se la denomine *agua capilar*, es fácilmente extraíble y se encuentra en equilibrio higroscópico con el medio circundante. La remoción del agua contenida en los poros mayores a 50 nm no causa cambio de volumen, mientras que la remoción del agua retenida por tensión capilar en los huecos comprendidos entre aproximadamente 5 y 50 nm, puede causar la contracción de la pasta.

Resumidamente es posible establecer que los poros presentes en el hormigón tienen distinto origen, poseen los más diversos tamaños y su distribución y conectividad en la mezcla pueden ser muy variadas. Como las propiedades de transferencia de materia en medios porosos dependen tanto de la distribución de tamaños de poros como de su conectividad, de todas estas clases de poros que pueden existir en el hormigón endurecido, los que más interesan desde el punto de vista durable son aquellos que al estar comunicados entre sí y con el exterior, permiten el paso de los agentes externos al interior de la masa del hormigón, de los cuales los más importantes son los poros o canales capilares.

## 2.3. El fenómeno de la Succión Capilar

### 2.3.1. Origen de la Tensión Superficial

Entre las moléculas que constituyen un fluido existen fuerzas de cohesión intermolecular, debido a la atracción electromagnética entre partículas adyacentes dentro de un mismo cuerpo.

En el caso del agua líquida, sus moléculas se sienten atraídas unas con otras debido fundamentalmente a las fuerzas del enlace *punte de hidrógeno*. Aunque la molécula de agua en su conjunto es eléctricamente neutra, su distribución de cargas no es simétrica, es decir existen centros de concentración de cargas positivas y negativas que provocan la formación de un dipolo (Fig. 2.2). La existencia del dipolo conlleva a la atracción entre las moléculas polares, es decir a la aparición de fuerzas cohesivas entre dichas moléculas, generando su mutua atracción.

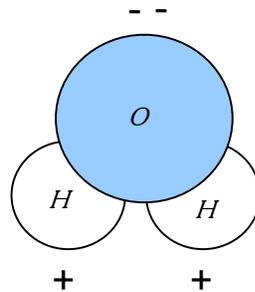
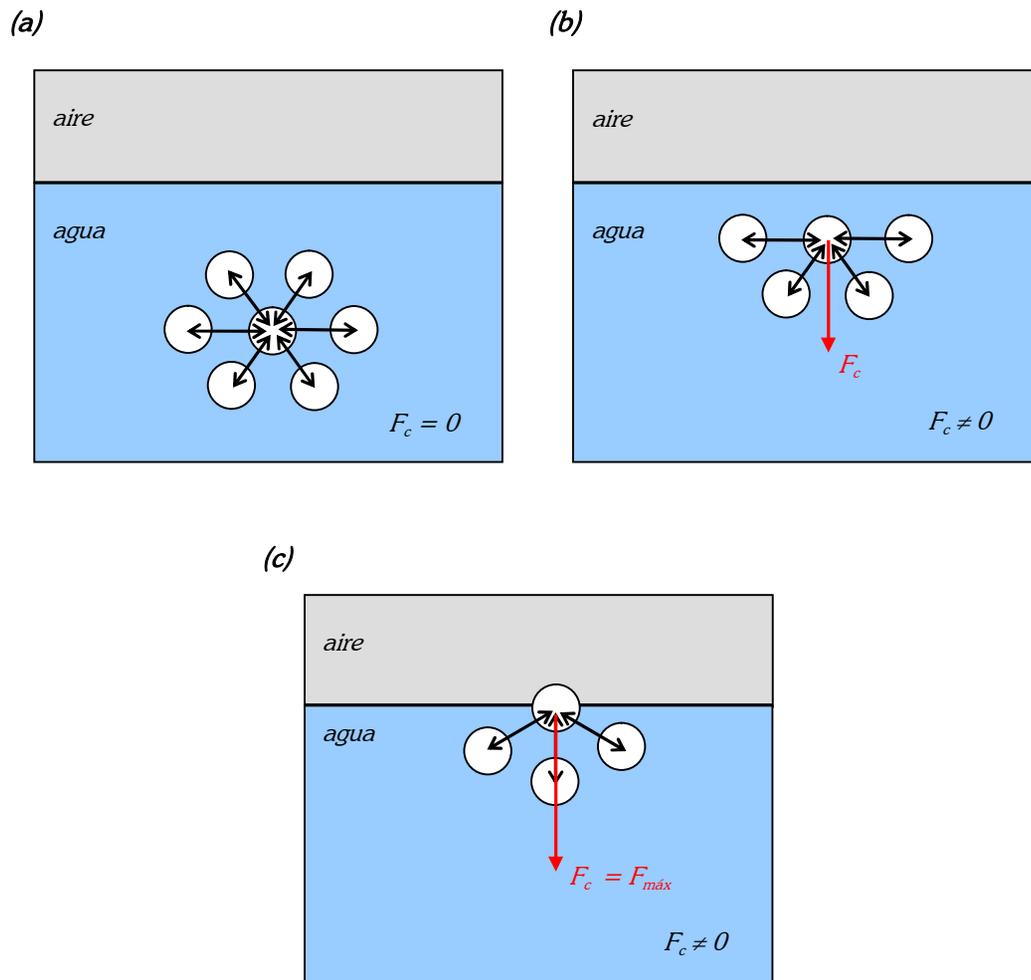


Figura 2.2: Polaridad de la molécula de agua.

En el interior del líquido, las moléculas situadas lejos de la superficie están rodeadas en todas las direcciones por moléculas vecinas, de manera que la resultante de las fuerzas de cohesión ( $F_c$ ) es nula y por lo tanto la molécula se encuentra en equilibrio, presentando una energía suficientemente baja (Fig. 2.3a). Una molécula ubicada cerca de la superficie, sólo está rodeada parcialmente de

otras moléculas del líquido, lo que ocasionará una fuerza cohesiva que tiende a alejarla de dicha superficie (Fig. 2.3b), siendo su dirección perpendicular a la superficie de separación líquido-gas. Por otro lado, las moléculas ubicadas justo en la interfase líquido-gas al no presentar por encima moléculas vecinas, experimentarán una fuerza atractiva neta hacia el interior del líquido que será máxima y su energía se incrementará considerablemente (Fig. 2.3c).



**Figura 2.3:** Fuerzas intermoleculares actuantes sobre una molécula de agua de acuerdo a su ubicación relativa respecto de la interfase líquido-gas: **(a)** alejada de la interfase, **(b)** cerca de la interfase y **(c)** sobre la interfase.

Desde el punto de vista energético, las moléculas ubicadas sobre la interfase presentan mayor energía que las situadas en el seno del líquido. Como todo sistema mecánico tiende al estado de menor energía potencial, el líquido tenderá entonces a reducir su energía total, para lo cual disminuye el número de moléculas situadas en la interfase líquido-gas. Esto último lo logra mediante la disminución de su área hasta el máximo posible, de allí que los líquidos tiendan a adoptar la forma esférica, que es la que presenta menor relación área/volumen.

La superficie se encuentra entonces bajo tensión, presenta una cierta resistencia a aumentar su área y se comporta como si fuera una delgada película elástica, fenómeno conocido como *tensión superficial*. La tensión superficial es definida como la cantidad de energía por unidad de área necesaria para aumentar su superficie. Usualmente se representa con la letra  $\gamma$  y se expresa en las unidades derivadas del sistema internacional ( $\text{J/m}^2$  o  $\text{N/m}$ ).

La tensión superficial depende de la naturaleza del líquido, del medio que lo rodea y de la temperatura. Así, los líquidos cuyas moléculas presenten fuerzas de atracción intermoleculares fuertes tendrán una tensión superficial elevada. En la Tabla 2.1 se presentan valores típicos de la tensión superficial para diferentes líquidos.

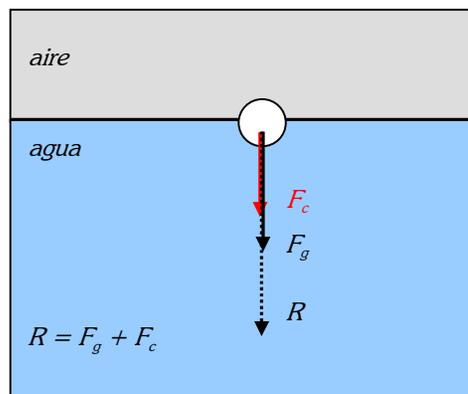
**Tabla 2.1:** Valores de tensión superficial de diferentes líquidos.

<i>Líquido</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i><math>\gamma</math> (<math>10^3 \text{ N/m}</math>)</i>
Aceite de oliva	20	33,06
Agua	20	72,8
Agua	60	66,2
Agua	100	58,9
Alcohol etílico	20	22,8
Benceno	20	29,0
Glicerina	20	59,4
Mercurio	20	465,0
Petróleo	20	26,0

Respecto al medio exterior, sus moléculas ejercen acciones atractivas sobre las moléculas situadas en la superficie del líquido, contrarrestando las acciones de las moléculas del líquido. Si en el exterior del líquido se tiene un gas, la fuerza atractiva hacia el exterior resultará mínima y despreciable debido a la gran diferencia de densidades entre el líquido y el gas. En cuanto a la temperatura, la tensión superficial disminuye conforme la misma se incrementa, debido a que existe una reducción en las fuerzas cohesivas al aumentar la agitación térmica (Tabla 2.1).

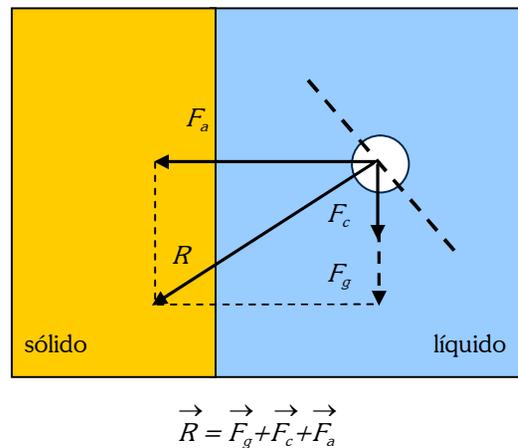
### 2.3.2. Mojado – Ángulo de contacto

Sobre una molécula ubicada sobre la superficie límite de separación líquido-gas actúan dos tipos de fuerzas: la fuerza de cohesión  $F_c$ , que se debe a la atracción que ejerce el resto de las moléculas sobre aquella y la fuerza gravitacional debida a su propio peso  $F_g$  (Fig. 2.4). Como la superficie líquida tiende a ser normal a la resultante de todas las fuerzas actuantes sobre la molécula, en este caso la resultante va dirigida hacia abajo, y la interfase resulta horizontal.



**Figura 2.4:** Fuerzas actuantes sobre una molécula ubicada sobre la interfase líquido-gas.

Sin embargo, una molécula ubicada sobre la superficie del líquido pero en las cercanías de un cuerpo sólido, como pueden ser las paredes internas de un poro capilar, experimentará además de la fuerza gravitacional y de cohesión, una fuerza de adherencia  $F_a$  dirigida hacia la superficie del sólido, consecuencia de la atracción producida por las moléculas de dicho sólido (Fig. 2.5). La adhesión se debe al hecho de que el capilar está compuesto por un material que posee cargas eléctricas negativas libres sobre las cuales se adhieren los polos positivos de la molécula de agua.

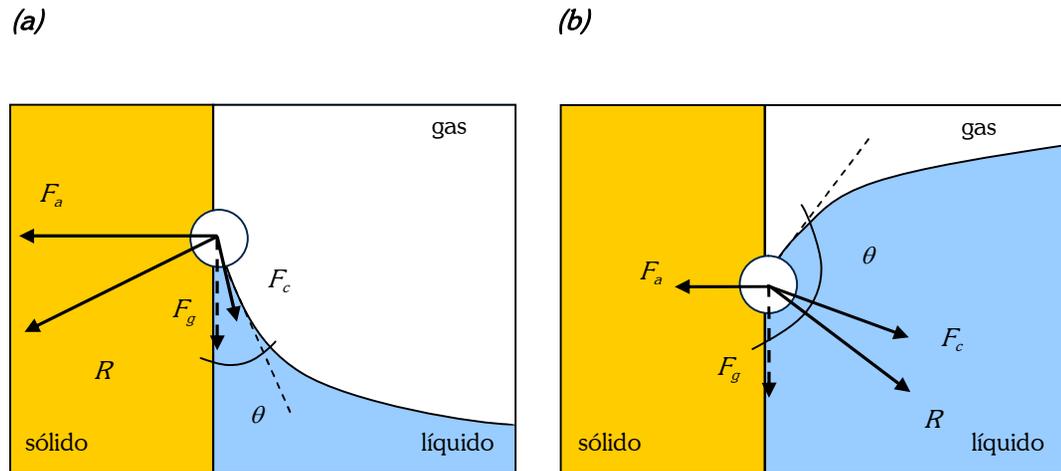


**Figura 2.5:** Fuerzas actuantes sobre una molécula ubicada sobre la interfase líquido-gas en las cercanías de un cuerpo sólido.

En un tubo delgado, el ascenso o descenso que experimente el líquido en contacto con las paredes del tubo dependerá de la magnitud de las fuerzas actuantes, así si las fuerzas de adhesión agua-sólido son mayores que las de cohesión agua-agua se producirá el ascenso, en el caso contrario se tendrá un descenso.

A su vez, la forma que adquiera la superficie del líquido dependerá de la dirección de la resultante de dichas fuerzas. Cuando la resultante está dirigida hacia el interior de la pared del sólido ( $F_a > F_c$ ) se forma un menisco cóncavo y se dice

que el líquido moja la superficie (Fig. 2.6a). En este caso el ángulo de contacto  $\theta$ , formado entre la tangente del menisco en el punto de contacto con el sólido y la pared de dicho sólido, resulta menor a  $90^\circ$ . Cuando la resultante está dirigida hacia el interior del líquido ( $F_a < F_c$ ), el menisco resulta convexo, el ángulo de contacto superior a  $90^\circ$ , y se dice entonces que el líquido no moja la superficie (Fig. 2.6b).



**Figura 2.6:** Fuerzas intermoleculares actuantes sobre una molécula ubicada en la proximidad de un cuerpo sólido, de un líquido **(a)** que moja la superficie y **(b)** que no moja la superficie.

### 2.3.3. Capilaridad - Ley de Jurín

El hormigón como todo material poroso, en contacto con un fluido interacciona con él y experimenta un intercambio de masa a través de su estructura porosa, consecuencia del fenómeno denominado capilaridad.

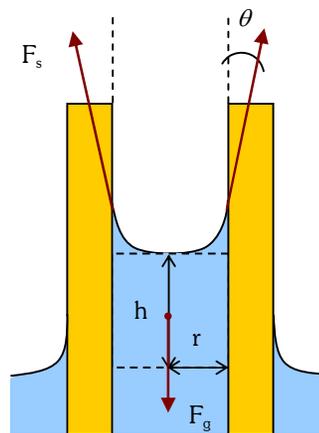
El movimiento de un líquido a través de un tubo capilar depende de las intensidades de las fuerzas de adhesión con el sólido y de cohesión con las moléculas del líquido. Cuando el hormigón se pone en contacto con el agua, la red de poros capilares actúa succionando el líquido de manera tal que induce el

ascenso, debido a que las fuerzas de adhesión agua-hormigón resultan mayores que las de cohesión agua-agua.

Cuando el agua toma contacto con las paredes del tubo (capilares en el hormigón), inmediatamente moja dichas paredes debido a la acción de las fuerzas de adherencia, adquiriendo la superficie una forma cóncava. Simultáneamente, en la interfase agua-gas, las fuerzas de cohesión responsables de la tensión superficial, tenderán a reducir su energía total, para lo cual toda la superficie asciende tratando de recuperar su forma original y de esta manera reducir su energía.

Así, el nivel del líquido en el interior del capilar comenzará a ascender y migrará libremente bajo la acción de las mismas fuerzas capilares actuando sobre las paredes del conducto capilar. El ascenso culmina cuando la resultante de las fuerzas de cohesión iguala al peso de la columna de agua que se formó en su ascenso.

Si se analizan las fuerzas verticales actuantes sobre una columna de agua de altura  $h$  de un tubo delgado de radio  $r$  (análogo a un poro capilar en el hormigón) se tendrán dos tipos de fuerzas, una debida al peso de la columna de agua  $F_g$  y otra debida a la tensión superficial actuante sobre las paredes del tubo  $F_s$  (Fig. 2.7):



**Figura 2.7:** Fuerzas actuantes sobre la columna líquida de un tubo capilar.

La expresión de dichas fuerzas está dada por:

$$F_g = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g = \rho \cdot (\pi \cdot r^2 \cdot h) \cdot g$$

$$F_s = L \cdot \gamma = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \gamma$$

donde:

$m$ : masa de la columna de agua de altura  $h$ , (kg)

$g$ : aceleración de la gravedad, (m/s<sup>2</sup>)

$\rho$ : densidad del líquido, (kg/m<sup>3</sup>)

$V$ : volumen de la columna líquida de altura  $h$  y radio  $r$ , (m<sup>3</sup>)

$L$ : perímetro de la sección transversal del volumen líquido, (m)

$\gamma$ : tensión superficial, (N/m)

La fuerza debida a la tensión superficial actúa en todo el perímetro  $L$  del tubo de radio  $r$ , de la cual sólo se considerará la componente vertical para el equilibrio de fuerzas verticales, en cuyo caso se tendrá:

$$F_g = F_s \cdot \cos \theta$$

$$\rho \cdot (\pi \cdot r^2 \cdot h) \cdot g = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \gamma \cdot \cos \theta$$

y despejando  $h$  se tendrá:

$$\text{Ec. (2.1)} \quad h(m) = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r}$$

Esta expresión es la conocida *ley de Jurín*, la cual establece que la altura que puede adquirir un líquido en el interior de un tubo estrecho de la dimensión de un capilar, es directamente proporcional a su tensión superficial e inversamente proporcional a la densidad del líquido y al radio del capilar. De allí que el ascenso

será mayor cuanto menor sea el diámetro del capilar, por otro lado, aquellos líquidos de elevada tensión superficial adquirirán mayor altura en su interior.

A la misma expresión dada por la Ec. (2.1) se puede llegar a partir de la Ley de Laplace, considerando la diferencia de presiones entre las dos caras de una lámina. Por otro lado, además de la altura alcanzada por el líquido, es posible estimar la velocidad de ascenso del flujo  $v$  en el tubo capilar mediante la expresión propuesta por Washburn (Basheer, 2001) dada por:

$$\text{Ec. (2.2)} \quad v \left( \frac{m}{s} \right) = \frac{r \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{4 \cdot d \cdot \mu}$$

donde:

$r$ : radio del capilar, (m)

$\gamma$ : tensión superficial, (N/m)

$\theta$ : ángulo de contacto, (grados)

$d$ : profundidad de penetración del líquido (m)

$\mu$ : viscosidad del fluido, (N.s/m<sup>2</sup>)

Tanto la Ec. (2.1) como la Ec. (2.2) son el resultado de deducciones teóricas considerando como hipótesis que el capilar es un tubo ideal de sección transversal constante, perfectamente circular y exactamente alineado con la dirección del flujo. Debido a ello, no son estrictamente aplicables al hormigón por tratarse de un material esencialmente heterogéneo, por la presencia de una rugosidad superficial que modifica el ángulo de contacto entre el sólido y la superficie del líquido, y fundamentalmente por presentar una red de poros capilares muy tortuosa y de disposición caprichosa que convergen y divergen hacia los poros vecinos de una manera aleatoria.

Resulta por lo tanto poco confiable calcular parámetros de caracterización del fenómeno de succión capilar en hormigones, tales como la altura adquirida por

el perfil de agua o la velocidad de ascenso capilar, mediante expresiones obtenidas de deducciones teóricas puras que no contemplen alguna base experimental o características tecnológicas propias del hormigón ensayado. Teniendo en cuenta esta cuestión, se han propuesto diferentes metodologías de evaluación de la succión capilar, fundamentadas la gran mayoría en técnicas de ensayo de bases empíricas.

#### 2.4. Técnicas de evaluación

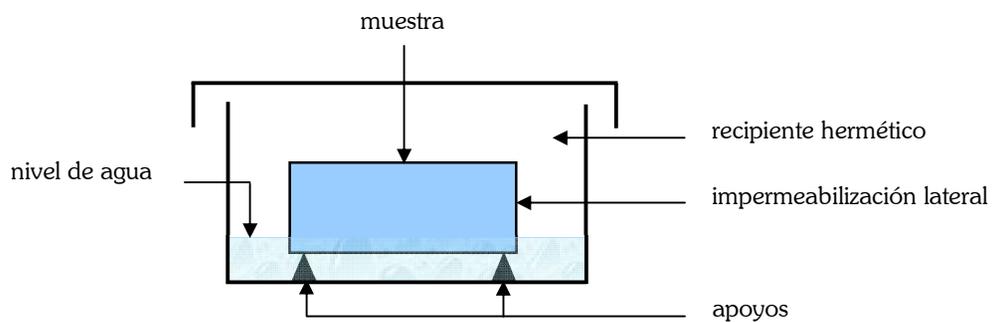
Existen varios métodos para medir las características de absorción en hormigones, los cuales se clasifican en tres categorías (Basheer, 2001): ensayos que evalúan la capacidad de absorción de agua ("*water absorption capacity tests*"), aquellos que miden la sorptividad ("*sorptivity tests*"), y los que evalúan la absorbencia ("*absorptivity tests*").

Los primeros determinan la porosidad efectiva del hormigón, a través del incremento de masa que experimentan muestras colocadas en inmersión un cierto período de tiempo. Para ello es necesario previamente secar las muestras de ensayo hasta peso constante. No es el objetivo de estos ensayos medir la velocidad de succión capilar sino más bien la capacidad de absorción de agua. Las normas más divulgadas que especifican este ensayo son la BS 1881-122 y la ASTM C 642.

En los ensayos que se mide la sorptividad, se somete a las muestras al contacto con agua por una de sus caras permitiendo el libre ingreso de un flujo unidireccional a través del hormigón (Fig. 2.8).

Se trata de una metodología casi exclusiva de laboratorio donde el cálculo de la sorptividad, identificada con el parámetro  $S$ , se puede llevar a cabo por medio de la medición del volumen de agua absorbido por la muestra, técnica definida por Hall (1989) como *método gravimétrico directo*, o bien por la

medición de la profundidad de penetración del perfil húmedo. Ambas técnicas permiten calcular el parámetro  $S$ , y a pesar de presentar las mismas unidades, los valores obtenidos mediante la técnica del perfil de penetración resultan entre 3 y 10 veces superiores a los obtenidos mediante la medición del volumen acumulado del líquido absorbido (Hall y Hoff, 2002). Según estos investigadores es más fácil y preciso evaluar el volumen del líquido absorbido, ya que en el caso de la medición del frente húmedo la lectura se torna dificultosa con el avance de la absorción.



**Figura 2.8:** Esquema del ensayo de succión capilar.

En cuanto a las técnicas de ensayo del método gravimétrico, existen numerosas metodologías que dependen de la normativa aplicada con variantes en la forma de cálculo, en el pre-acondicionamiento de las muestras y en las condiciones ambientales, tema que será abordado en detalle en el *Capítulo 4*.

En los ensayos que se encuentran clasificados dentro de la tercer categoría, el ingreso del líquido a través del hormigón no se produce en forma unidireccional y no existe control sobre la dirección del fluido, por ello pueden ser aplicados tanto en laboratorio como in situ. En dichos ensayos, el movimiento de agua es inducido mediante la aplicación de un nivel bajo de presión, de manera que el ingreso del líquido se produzca por succión capilar, pudiendo ser del tipo superficial o intrusivo.

Entre los métodos superficiales se encuentran el "*Initial Surface Absorption Test*" (ISAT) (Dhir *et al.*, 1987; Long *et al.*, 2000), "*Autoclam Sorptivity Test*" (Long *et al.*, 2000; Basheer, 2001; Hall y Hoff, 2002) y el "*Standpipe Absorptivity Test*" (Meyer 1987; Basheer, 2001), entre otros. El ensayo ISAT otorga una medida empírica e in situ de las propiedades de absorción de agua de los hormigones en estudio. Consiste básicamente en un casquete que colocado sobre la superficie del hormigón, aplica una presión de agua pequeña, midiéndose a intervalos de tiempos fijos la velocidad de absorción de agua por el movimiento del menisco en un tubo capilar graduado (Fig. 2.9).

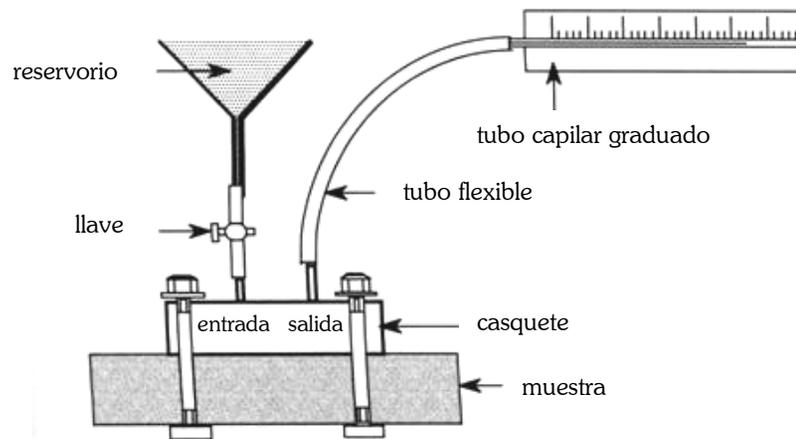


Figura 2.9: Esquema del ensayo ISAT (Long *et al.*, 2000).

El *Autoclam Sorptivity Test* fue diseñado con el objetivo de proveer mediciones in situ de la sorptividad y permeabilidad, radicando la diferencia en la presión de agua aplicada. Este ensayo también utiliza un casquete sobre la superficie de hormigón, pero aquí la cantidad de agua absorbida es determinada siguiendo el movimiento de un pistón contenido en un cilindro acoplado al casquete (Fig. 2.10).

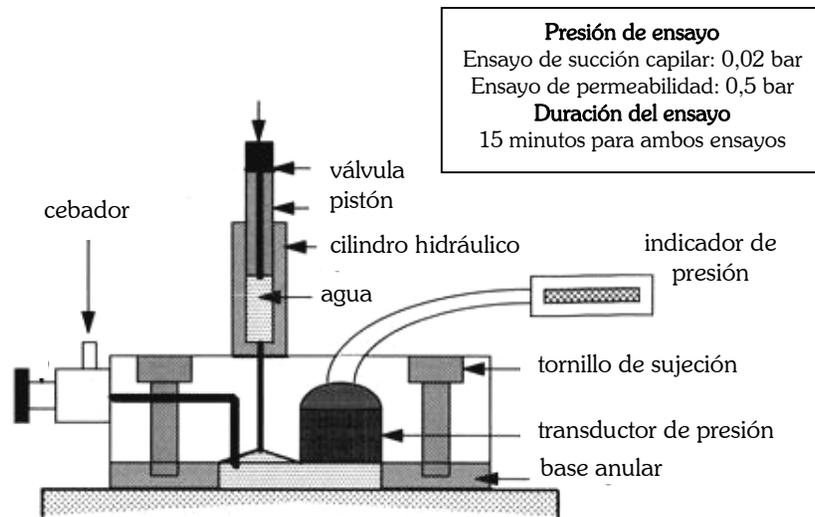


Figura 2.10: Esquema del ensayo Autoclav (Long *et al.*, 2000).

El *Standpipe Absorptivity Test*, opera bajo un principio similar al *ISAT* aunque resulta menos preciso. En esta metodología se coloca un tubo conteniendo agua en su interior, en contacto con la superficie del hormigón, registrándose la cantidad de agua absorbida por dicho material en un cierto tiempo (Fig. 2.11).

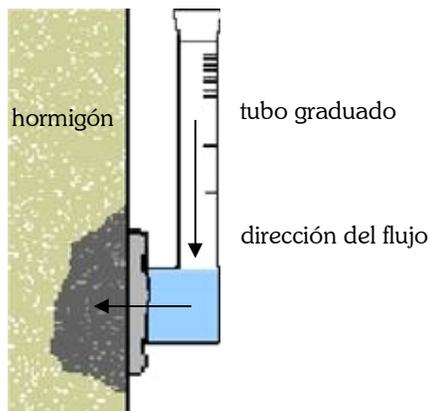
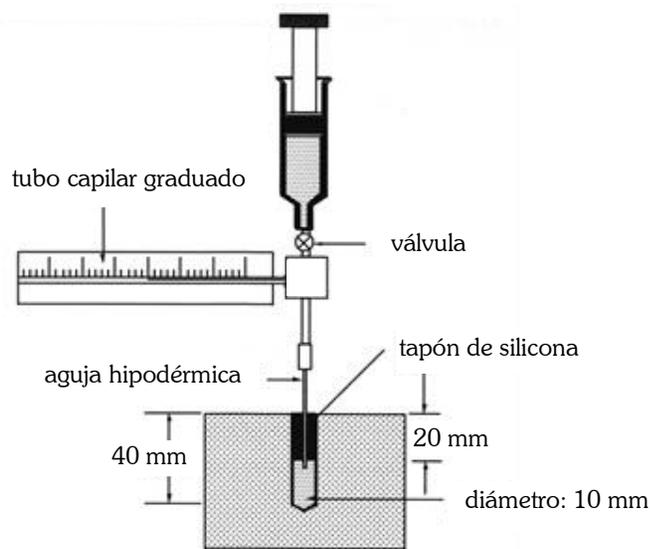


Figura 2.11: Esquema del ensayo Standpipe.

Las técnicas de tipo intrusivas son aquellas en las que se efectúa una perforación y sobre ese área de influencia se realizan las determinaciones. Fueron desarrollados como métodos empíricos para establecer comparaciones entre diferentes hormigones, y expresan las propiedades de absorción de agua de un determinado hormigón en términos del tiempo requerido para absorber un volumen fijo de agua durante el proceso de absorción. Se podría obtener una información más útil si se realizara un monitoreo constante de la absorción del agua a través de un período de tiempo más prolongado (Hall y Hoff, 2002). Ejemplos de estas metodologías los constituyen el "*Figg Water Permeability Test*" (Figg, 1973; Dhir *et al.*, 1987) (Fig. 2.12) y el "*Covercrete Absorption Test*" (CAT) (Dhir *et al.*, 1987) (Fig. 2.13), entre otros.



**Figura 2.12:** Esquema del ensayo Figg (Long *et al.*, 2000).

Existen también métodos basados en la medición de la distribución de humedad, que determinan el contenido de líquido en la muestra ensayada mediante el empleo de imágenes de resonancia magnética nuclear, tomografía de emisión positrónica, imágenes térmicas (Sosoro, 1998), radiografía neutrónica (Hanžič e Ilić, 2003) y absorción de rayos X y gamma. Se trata de técnicas

particularmente útiles para medir el contenido de agua en función del avance del perfil de agua en un material poroso inicialmente seco. Así, el volumen total del líquido absorbido puede ser estimado considerando el área del perfil a un determinado tiempo, lo cual provee una medida directa de  $S$ .

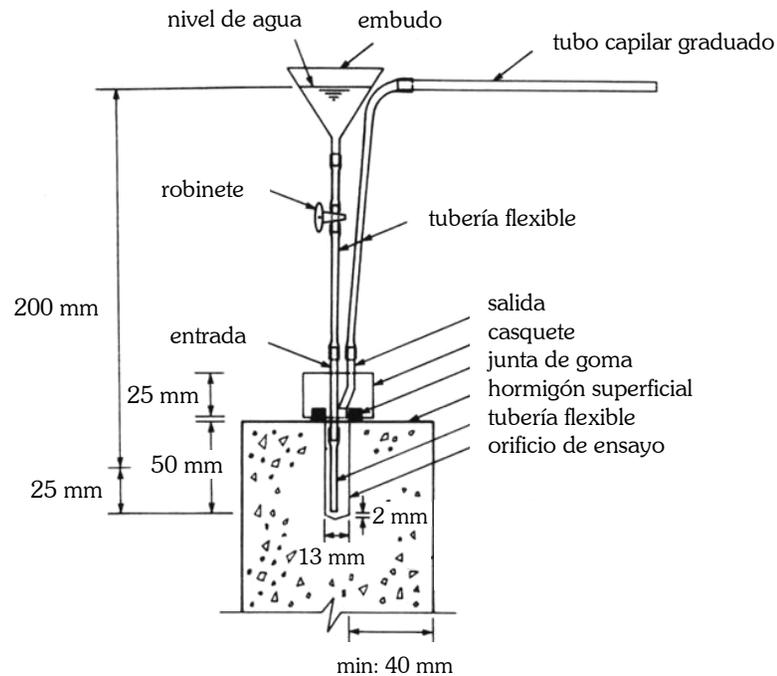


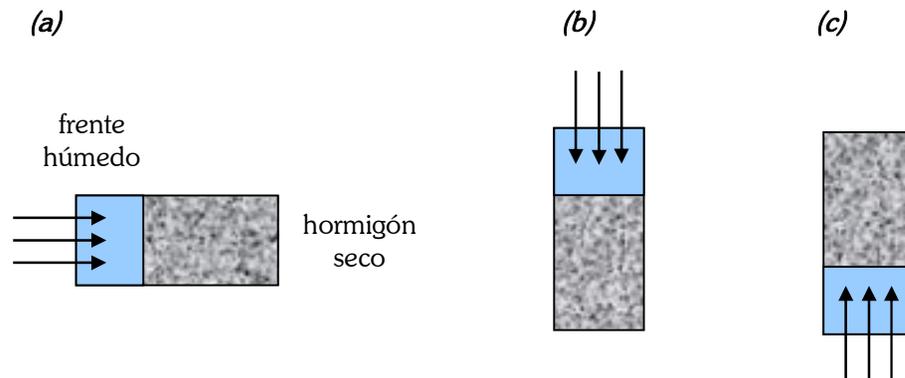
Figura 2.13: Esquema del ensayo Covercrete (Dhir *et al.*, 1987).

El presente estado del arte focaliza la revisión bibliográfica en la metodología conocida como *método gravimétrico*, cuyo objetivo es la medición de la sorptividad mediante la obtención del parámetro  $S$  de succión capilar conocido internacionalmente como *sorptivity*.

## 2.5. Cuantificación de la succión capilar

La absorción unidimensional de agua experimentada por un material poroso desde una fuente externa puede producirse según tres configuraciones:

caso horizontal, en el cual la absorción es independiente de los efectos gravitacionales (Fig. 2.14a), infiltración, en el cual el flujo total es la suma de los flujos impulsados por capilaridad y por gravedad (Fig. 2.14b), y ascensión capilar, en el cual los efectos capilares y gravitatorios se oponen (Fig. 2.14c).



**Figura 2.14:** Configuraciones de absorción de agua: (a) horizontal, (b) por infiltración y (c) por ascenso capilar (adaptado de Hall, 1989).

Los materiales de construcción porosos presentan en su mayoría un sistema de poros suficientemente finos, con lo cual las fuertes fuerzas capilares desarrolladas y las cortas distancias a través de las cuales ocurre la migración, permiten despreciar los efectos gravitatorios durante el ascenso capilar.

Por lo expuesto, la absorción de agua por capilaridad puede ser medida bajo cualquiera de las tres configuraciones descritas anteriormente. Debido a que dicho fenómeno se torna dominante, resulta conveniente efectuar la medición por medio de un ensayo simple en forma vertical, en vez de hacerlo en forma horizontal (Hall y Hoff, 2002).

Aparece entonces el método gravimétrico directo como una de las técnicas de evaluación de la succión capilar de mayor uso, practicidad, economía y fácil ejecución. El sustento teórico a dicha técnica lo constituye el modelo de

Buckingham-Richards desarrollado para el caso de flujo insaturado unidimensional en un material semi-infinito, cuestión que se abordará en detalle en el *Capítulo 3*.

La mencionada metodología fue utilizada primeramente por Hall (1989) para determinar en forma directa la velocidad de absorción de agua por capilaridad en materiales cementíceos y sobre la cual se basan la gran mayoría de las normas, incluida la norma IRAM 1871.

Dicha técnica considera que el volumen acumulado de líquido absorbido por unidad de área de afluencia  $i$  ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ ), se incrementa con la raíz cuadrada del tiempo de inmersión  $t$  (min) según la siguiente ley:

$$\text{Ec. (2.3)} \quad i = S \cdot t^{1/2}$$

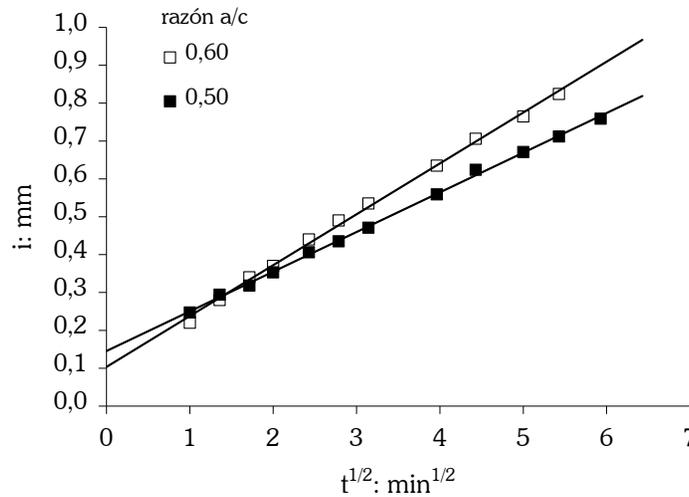
donde:

$S$ : sorptivity, [ $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$ ]

$t$ : tiempo de inmersión, (min)

El parámetro  $S$ , expresado en [ $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$ ] o también en ( $\text{mm}/\text{min}^{1/2}$ ), representa la sorptividad o *sorptivity* del material, el cual caracteriza la tendencia de un material poroso a absorber y transmitir agua a través de su masa por succión capilar (Hall, 1989; Sabir *et al.*, 1998). El fenómeno de la absorción de agua por capilaridad se halla directamente relacionado con la porosidad efectiva o accesible al agua (CYTED, 1997), por lo cual reviste gran importancia desde el punto de vista de la durabilidad.

$S$  se calcula como la pendiente de la recta obtenida por aproximación lineal de las determinaciones experimentales al graficar  $i$  vs.  $t^{1/2}$  (Fig. 2.15). En la Tabla 2.2 se presentan valores de dicho parámetro obtenidos en hormigones de distinta razón a/c.



**Figura 2.15:** Gráfico del incremento de masa en función de la raíz cuadrada del tiempo (Hall, 1989).

**Tabla 2.2:** Valores típicos de  $S$  en hormigones de distinta razón a/c (adaptado de Hall, 1989).

Composición	Razón a/c	Sorptivity [ $\text{mm}/\text{min}^{1/2}$ ]
Cemento/arena/agregado 1:2:4	0,40	0,094
	0,50	0,120
	0,60	0,170

Respecto a la metodología de cálculo, la succión capilar es cuantificada a través de diferentes parámetros, cuya definición responde a una determinada reglamentación, a fórmulas empíricas, o a metodologías y/o prácticas usualmente adoptadas en laboratorio.

La norma ASTM C 1585 propone el cálculo de dos parámetros: las velocidades inicial ( $S_i$ ) y secundaria ( $S_s$ ) de absorción de agua expresadas ambas en  $\text{mm}/\text{s}^{1/2}$ , para lo cual se debe graficar el incremento de masa por unidad de área de las muestras de ensayo en función de la raíz cuadrada del tiempo. La velocidad inicial, será la pendiente de la recta obtenida considerando los puntos experimentales comprendidos entre  $t = 1 \text{ min}$  y  $t = 6 \text{ h}$ . La velocidad secundaria

se calcula de la misma forma, pero considerando los puntos comprendidos entre  $t = 1$  día y  $t = 7$  días.

Por su parte, la norma IRAM 1871 propone el cálculo de la *capacidad (C)* y *velocidad de succión capilar (S)*, expresadas en  $g/m^2$  y  $g/(m^2 \cdot s^{1/2})$  respectivamente. La primera se define como el incremento de masa por unidad de área de la muestra de ensayo, correspondiente al tiempo en el que la variación de la masa húmeda resulta menor a 0,1% entre dos determinaciones sucesivas efectuadas cada 24 h. La velocidad es calculada como la pendiente de la recta obtenida al considerar sólo aquellos puntos en los cuales el incremento de masa por unidad de área de cada valor individual se halla comprendido entre el 10 y el 90% de la capacidad de succión capilar promedio de toda la serie de ensayos, debiendo estar incluidos los valores individuales extremos dentro del 15% del valor promedio.

La metodología de cálculo y ensayo propuesta por las normas anteriormente mencionadas (ASTM C 1585 e IRAM 1871) junto con la Recomendación RILEM TC 116-PCD, se analizan comparativamente y en forma detallada en el *Capítulo 4*.

La norma española UNE-EN 772-11 cuantifica la succión capilar a través del *coeficiente de absorción de agua por capilaridad*,  $C_{w,s}$  dado por la siguiente expresión:

$$\text{Ec. (2.4)} \quad C_{w,s} \left[ g / (m^2 \cdot s^{0.5}) \right] = \frac{(m_{so,s} - m_{seco,s})}{A_s \cdot \sqrt{t_{so}}} \cdot 10^6$$

donde:

$m_{so,s}$ : masa de la probeta después de la inmersión durante un tiempo  $t$ , (g)

$m_{seco,s}$ : masa de la probeta luego del secado, (g)

$A_s$ : superficie bruta de la cara de la probeta sumergida, ( $mm^2$ )

$t_{so}$ : tiempo de inmersión, (s)

La norma portuguesa LNEC E-393 propone para evaluar la succión capilar, el cálculo del incremento de masa por unidad de área para cada tiempo de ensayo. Además establece la medición de la altura de ascenso capilar, obtenida como la media aritmética de cuatro alturas luego de la rotura de la muestra al finalizar el ensayo.

La norma suiza SIA 162/1 plantea el cálculo de *la altura de agua absorbida* luego de 24 h,  $h_{24}$  (Ec. 2.5) y el *coeficiente de capilaridad*  $k$  (Ec. 2.6) de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$\text{Ec. (2.5)} \quad h_{24} (m) = H \cdot \frac{(S_{24} - S_{50})}{(S_f - S_{50})}$$

$$\text{Ec. (2.6)} \quad k [g / (m^2 \cdot s^{1/2})] = H \cdot \frac{(S_{24} - S_{50}) \cdot n \cdot \rho_w}{\sqrt{(24 \times 3600)}}$$

donde:

$H$ : altura de la probeta, (m)

$S_{24}$ : grado de saturación luego de 24 h, (adim.)

$S_{50}$ : grado de saturación luego de 2 días de secado a 50 °C previo al ensayo, (adim.)

$S_f$ : grado de saturación al humedecerse la cara superior de la muestra, (adim.)

$n$ : porosidad total, (%)

$\rho_w$ : peso específico del agua, (kg/m<sup>3</sup>)

El centro de investigación “Holderbank Management and Consulting Ltd.” de Suiza, propone una determinación abreviada de la succión capilar mediante el cálculo de la *velocidad de absorción de agua*,  $a$  (Ec. 2.7) y la *absorción*,  $S$  (Ec. 2.8).

$$\text{Ec. (2.7)} \quad a \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}} \right] = \frac{W_t}{A \cdot \sqrt{t}}$$

$$\text{Ec. (2.8)} \quad S \left( \frac{\text{cm}}{\text{h}^{0.5}} \right) = h / \sqrt{t}$$

donde:

$W_t$ : agua absorbida en el tiempo  $t$ , (g)

$A$ : sección transversal de la probeta, ( $\text{cm}^2$ )

$t$ : tiempo de inmersión, (h)

$h$ : altura de ascenso capilar, (cm)

Fagerlund (1982) establece que el estudio de la succión capilar se describe por tres coeficientes: la *resistencia a la penetración de agua*,  $m$  (Ec. 2.9), el *coeficiente de absorción capilar*,  $k$  (Ec. 2.10) y la *porosidad efectiva*,  $\varepsilon_e$  (Ec. 2.11). Para ello propone las siguientes expresiones:

$$\text{Ec. (2.9)} \quad m \left( \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \right) = \frac{t_n}{h^2}$$

$$\text{Ec. (2.10)} \quad k \left[ \frac{\text{kg}}{\left( \text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \right)} \right] = \frac{Q_n - Q_0}{\sqrt{t_n}} \cdot \frac{1}{A}$$

$$\text{Ec. (2.11)} \quad \varepsilon_e(a) = \frac{Q_n - Q_0}{A \cdot h \cdot 1000}$$

donde:

$t_n$ : tiempo para el cual se produce un cambio de pendiente, (s)

$h$ : espesor de la muestra, (m)

$Q_n$ : cantidad de agua absorbida hasta el instante en que se produce el cambio de pendiente, (kg)

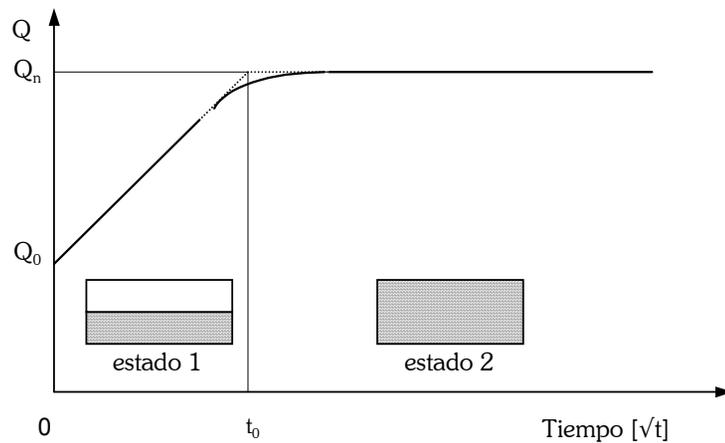
$Q_0$ : cantidad de agua correspondiente al instante  $t = 0$ , (kg)

$A$ : área en contacto con el líquido, ( $\text{m}^2$ )

Dicho autor idealiza la curva experimental obtenida en el ensayo de succión capilar y la supone compuesta por dos estados, el *estado 1* en el que se produce el ingreso del líquido por los poros capilares del hormigón y el *estado 2* en el que se considera a la muestra en estado de saturación (Fig. 2.16). En función de este modelo define la *cantidad total de agua absorbida por unidad de área*,  $W_a$  (Ec. 2.12) y la *velocidad de ascenso por capilaridad*,  $q_a$  (Ec. 2.13) como:

$$\text{Ec. (2.12)} \quad W_a \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right) = k \cdot \sqrt{t}$$

$$\text{Ec. (2.13)} \quad q_a \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right] = \frac{k}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}}$$



**Figura 2.16:** Modelo del gráfico de succión capilar (adaptado de Fagerlund, 1982).

Un análisis comparativo entre las diferentes metodologías de cálculo previamente descritas permite observar que la norma ASTM C 1585 diferencia claramente dos sectores en la curva de absorción en función del tiempo, el primero en el que la succión se produce muy rápidamente (velocidad inicial), y un segundo en el que la absorción decae abruptamente (velocidad secundaria). Sin embargo la norma IRAM 1871 calcula una única velocidad que no es tangente a la curva sino más bien secante.

Por otro lado, la norma ASTM C 1585 establece el cálculo de las velocidades para tiempos predefinidos independientemente del hormigón ensayado, mientras que la norma IRAM 1871 impone para el cálculo de la velocidad un límite superior dado por un porcentaje de la capacidad de succión, cuyo valor está indirectamente determinado por la calidad del hormigón.

Fagerlund al igual que la norma IRAM 1871 también considera que el fenómeno de succión capilar queda adecuadamente definido por dos parámetros: la velocidad y la capacidad de succión, y destaca la existencia de dos estados diferentes en la curva de absorción como lo establece la norma ASTM C 1585.

La norma española UNE-EN 772-11 no establece los tiempos entre los cuales se mide la tasa de succión capilar, sólo propone el cálculo de un coeficiente (Ec. 2.4), cuya determinación no surge en forma gráfica, sino mas bien es un cálculo instantáneo del incremento de masa por unidad de área en función de la raíz cuadrada de cada instante de tiempo considerado. Similar cálculo propone la norma portuguesa LNEC E-393, sólo que aquí se adiciona la medición de la altura de ascenso capilar del perfil húmedo de cada muestra al finalizar el ensayo. La expresión abreviada del centro de investigación Holderbank también sugiere un cálculo instantáneo de la velocidad de succión y la determinación de la altura de ascenso capilar que luego utilizará para calcular la absorción.

Algunas ecuaciones, como las propuestas por la norma suiza SIA 162/1 y por Fagerlund, tienen en cuenta en sus expresiones la altura de la muestra ensayada, mientras que en las normas ASTM C 1585 e IRAM 1871 esta cuestión está implícita al limitar el espesor de la muestra a ensayar.

Por otro lado, la norma suiza establece expresiones empíricas obtenidas a partir de parámetros que consideran períodos fijos de tiempo en el secado y humedecimiento, estados que varían considerablemente dependiendo de la calidad del hormigón.

Finalmente, debido a que cada normativa propone expresiones de cálculo y metodologías de ensayo particulares, los valores de los parámetros obtenidos por dichas expresiones no revisten carácter comparativo.

## **2.6. Influencia de distintos factores sobre la succión capilar**

Según la bibliografía consultada, el ensayo de succión capilar es muy sensible a las variaciones técnico-metodológicas bajo las cuales se lleva a cabo. Así, es posible diferenciar factores relativos a los parámetros de la muestra, a su pre-acondicionamiento, a las condiciones medioambientales y de ensayo; y los relativos a las características tecnológicas propias de la muestra ensayada.

### **2.6.1. Influencia de los parámetros de la muestra y pre-acondicionamiento**

#### **2.6.1.1. Tamaño de la muestra**

No se encuentra en la bibliografía consultada un claro estudio sobre la incidencia que puede tener el tamaño y forma de la muestra ensayada sobre la succión capilar. Las primeras publicaciones de Hall (1989) manifestaban la independencia del tamaño de la muestra sobre los resultados obtenidos, sin embargo algunos años después, se observó que al variar las dimensiones de la muestra se obtenían pequeñas diferencias en los resultados alcanzados. Este hecho fue atribuido a cierto efecto de retardo en el desplazamiento lateral del aire consecuencia del sellado lateral, cuestión que cobra magnitud con el aumento en el tamaño de la muestra (Hall y Hoff, 2002).

Por otro lado, al ser el hormigón un material “heterogéneo” debido a la presencia de los agregados como materiales constituyentes, la muestra debe ser lo suficientemente grande como para constituirse en representativa de toda la masa.

Por ello la norma IRAM 1871 establece una dependencia del tamaño de la muestra con el tamaño máximo nominal del agregado grueso.

### **2.6.1.2. Ubicación de la muestra**

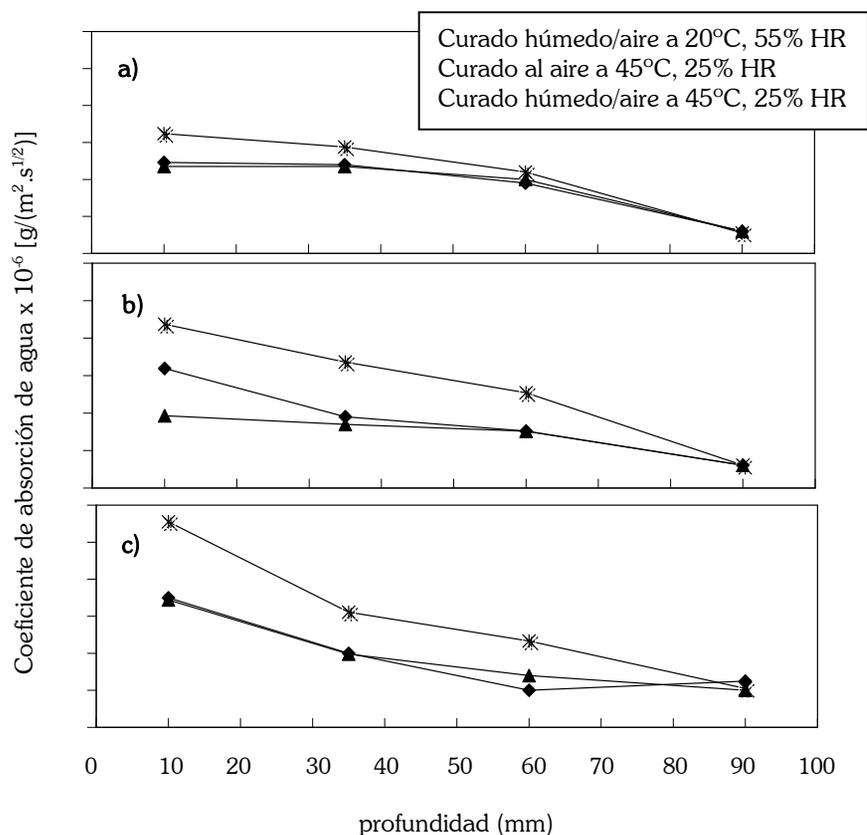
Al compararse muestras de hormigón extraídas de zonas exteriores e interiores de estructuras construidas, se encontró que las diferencias de porosidad halladas podían ser atribuidas en orden creciente de importancia a: la profundidad de carbonatación de las muestras externas, la calidad de la mezcla y eficiencia del curado, y a la dirección de moldeo y compactación (Dias, 2000).

Con el fin de estudiar el efecto de la profundidad de la muestra ensayada, González *et al.* (2003) moldearon prismas de 150 x 150 x 520 mm, sobre los que calaron testigos de 100 mm de diámetro, que luego fueron aserrados para obtener 5 muestras a distintas profundidades desde la cara de moldeo. Se observó que independientemente del tipo de curado aplicado, los hormigones de razón  $a/c \leq 0,50$  no presentaron diferencias sustanciales en el comportamiento frente a la succión capilar. Sin embargo para razones  $a/c$  mayores, las diferencias entre las distintas rodajas se hacían más importantes, evidenciándose una disminución de los parámetros de absorción capilar con el aumento en la profundidad de la muestra ensayada.

Otros investigadores (Khatib y Mangat, 1995), también analizaron la influencia de la ubicación de la muestra, pero sobre rodajas de aproximadamente 23 mm de espesor. Dichas muestras se obtuvieron de testigos extraídos en dirección paralela y perpendicular a la dirección de moldeo, correspondiente a cubos de 100 mm de arista provenientes de hormigones curados bajo distintos regímenes de humedad y temperatura.

Se halló una diferencia en los valores de absorción de las muestras, tanto por inmersión total como por succión capilar, dependiendo de su ubicación en la

probeta. Los mayores valores correspondieron a la muestra extraída de la parte superior, mientras que los menores a la parte inferior (Fig. 2.17). Los autores advirtieron que tal comportamiento fue consecuencia de la segregación natural de los componentes más livianos durante la compactación, que generó gradientes de razón a/c más elevados próximos a la superficie de moldeo. Las muestras tomadas de los sectores laterales del cubo presentaron características de absorción intermedias entre los dos casos anteriores.



**Figura 2.17:** Influencia de la profundidad de la muestra ensayada sobre hormigones (a) patrones, (b) con 22% de ceniza volante y (c) con 9% de humo de sílice (Khatib y Mangat, 1995).

En relación a la influencia del tipo de curado, los resultados indicaron que las diferentes características de absorción entre los sectores superior e inferior se hicieron más acentuadas cuando el curado se efectuó en su totalidad al aire,

respecto a aquellas muestras que permanecieron el mismo lapso de tiempo en un ambiente húmedo, resultando los valores de succión capilar en la cara superior del orden de tres veces la inferior.

Por otro lado, sobre muestras extraídas de zonas exteriores en contacto con los moldes se observó el llamado “efecto pared” (Cantarelli *et al.*, 2005). Dicho fenómeno fue advertido al evaluar muestras consistentes en rodajas de 50 mm de espesor obtenidas del aserrado de testigos de 100 x 200 mm, calados de probetas de 750 x 200 x 150 mm en sentido perpendicular a la dirección de moldeo. Los hormigones estudiados fueron elaborados con cemento portland normal sin adiciones y cemento compuesto por un 70% de escoria y 20% de ceniza volante. El curado consistió en el estacionamiento de las probetas durante 7 días en cámara húmeda y los restantes días hasta la edad de ensayo en ambiente exterior.

El análisis de la absorción capilar de los diferentes hormigones indicó que a los 91 días, independientemente del tipo de mezcla y de la relación agua/material cementíceo, hubo una mayor cantidad de agua absorbida en las muestras cuyas superficies exteriores coincidieron con el espesor de recubrimiento. La existencia del “efecto pared” fue observado sólo en los hormigones con adiciones minerales, no evidenciándose en los hormigones elaborados con cemento portland normal.

### **2.6.1.3. Sellado lateral**

Las muestras deben sellarse lateralmente con el fin de minimizar la pérdida por evaporación del líquido absorbido, sobre todo cuando se trabaja con líquidos orgánicos volátiles. Además es recomendable tapar el recipiente para proveer una presión de vapor alta en el entorno de las muestras bajo ensayo.

El sellado tiene que garantizar la impermeabilización lateral de las muestras, pero se debe tener presente que algunos productos como las pinturas bituminosas y las resinas epoxy no son apropiadas para todos los líquidos orgánicos.

Martys y Ferraris (1997) estudiaron la influencia del sellado de las muestras y del cubrimiento del recipiente que las contiene (Fig. 2.18). Observaron que las muestras expuestas al aire sin ninguna protección (*SP*), presentaron un marcado decrecimiento en la cantidad de agua acumulada a través del tiempo, debido a la evaporación por las caras laterales. Por otro lado, al tapar el recipiente de ensayo (*RT*), observaron que las muestras experimentaban un marcado incremento en la succión capilar, debido a la alta humedad relativa del entorno. Las muestras selladas lateralmente y colocadas en el recipiente tapado (*SL+RT*) exhibieron un comportamiento intermedio.

Además, dichos autores percibieron una diferencia insignificante en la succión capilar de muestras con las caras laterales selladas, respecto a otras que presentaron también sellada la cara superior.

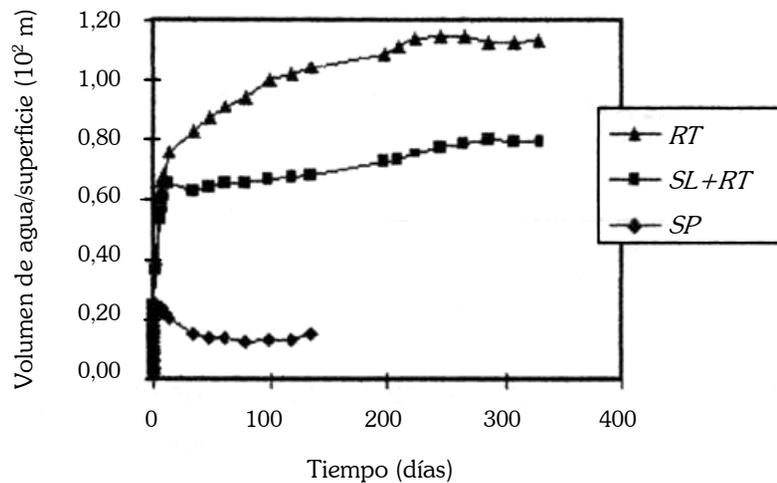


Figura 2.18: Influencia del sellado de las muestras y del cubrimiento del recipiente (adaptado de Martys y Ferraris, 1997).

#### 2.6.1.4. Secado - Contenido inicial de humedad

La succión capilar puede ser medida solamente en morteros y hormigones parcialmente saturados. En los materiales saturados los capilares se encuentran

llenos de agua, mientras que en los totalmente secos la absorción del agua se produce a través de los capilares y también en los poros del gel, por lo cual los resultados se encontrarían distorsionados y no resultarían comparables (Sabir *et al.*, 1998). Por otro lado, dichos resultados son dependientes del contenido inicial de agua, por ello previo a la ejecución del ensayo las muestras deben ser secadas hasta masa constante, colocándolas en el interior de una estufa preferentemente ventilada (SIA 162/1), a una temperatura fija y durante un cierto período de tiempo.

Durante el secado se procura la obtención de un contenido uniforme de humedad en todo el espesor de la muestra. Si esta operación no se realiza en forma controlada, puede producirse una distribución no uniforme de la humedad, provocando sólo un secado superficial. Esto último puede inducir a la obtención de valores de  $S$  inferiores a los que se obtendrían bajo un adecuado régimen de secado (Hall y Hoff, 2002). Por otro lado, una distribución no uniforme de la humedad provoca un apartamiento del comportamiento lineal de la absorción con  $t^{1/2}$  (Hall, 1989).

Durante el secado se controla la pérdida de peso sufrida por la muestra cada 24 h y su duración se extenderá hasta alcanzar la constancia de masa. Muchos investigadores suponen que la muestra ha completado su proceso de secado o bien ha alcanzado su "peso constante", cuando la variación de masa evaluada cada 24 h resulta menor que un porcentaje fijo habitualmente convenido en el 0,1%. Reda Taha *et al.* (2001) referencian otros trabajos en los cuales se sostiene que el secado de las muestras de hormigones de diferente calidad durante un período fijo de tiempo, no garantiza iguales estados de humedad, por ello la importancia del secado hasta peso constante.

Los perfiles de distribución de humedad interna se "suponen" uniformes cuando una vez alcanzada la constancia de masa, se permite la redistribución espontánea del líquido en el interior de la muestra, impidiendo la pérdida hacia el

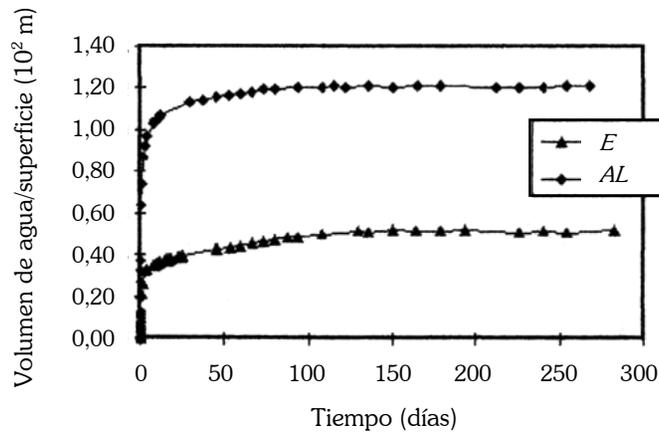
exterior desde la superficie externa. Para ello, suele envolverse la muestra con papel de aluminio o con alguna membrana polimérica o film adherente, evitando dañar la envoltura.

Al respecto, Hall y Hoff (2002) referencian que en otras investigaciones resultaba muy dificultoso e incluso prácticamente imposible, obtener contenidos de agua uniformemente distribuidos por medio de una redistribución capilar espontánea, en muestras de materiales cementíceos con bajos contenidos totales de agua. Lo anterior fue asociado a la continua interacción química del agua con el cemento hidratado (lo cual también resulta en una succión capilar anómala).

Respecto a la temperatura de secado existe una gran controversia. Es evidente que el secado debe efectuarse a una temperatura mayor que la del ambiente, ya que de lo contrario se produciría una distribución no uniforme del contenido de agua, que se traduciría a posteriori en un apartamiento de la linealidad en la gráfica de  $i$  vs.  $t^{1/2}$ .

Algunos autores proponen como temperatura 105 °C, ya que un secado a menor temperatura no permite alcanzar una distribución uniforme de humedad (Hall, 2002) e implica un tiempo demasiado prolongado. Por otro lado, el secado más allá de los 100 °C en hormigones y en materiales cementíceos, puede provocar alguna alteración química y cierto daño a la microestructura (Reda Taha *et al.*, 2001). Sumado a ello, el apartamiento de la linealidad de  $i$  vs.  $t^{1/2}$  experimentado al emplear fluidos orgánicos como líquido de ensayo, se reduce si el secado se efectúa a 65 °C en vez de 105 °C (Sosoro, 1998). Sin embargo, Hall y Hoff (2002) encontraron que los valores de  $S$  de muestras secadas a 105 °C prácticamente no cambiaron respecto a aquellas secadas a 65 °C. Estos investigadores proponen en el caso de materiales cementíceos, iniciar el secado a 40 °C para finalmente ascender la temperatura a 105 °C.

Martys y Ferraris (1997) compararon hormigones secados a 50 °C en estufa (*E*), con otros cuyo secado consistió sólo en un estacionamiento en ambiente de laboratorio a 20 °C y 30% de HR (*AL*) (Fig. 2.19). Los resultados demostraron claramente la influencia del nivel de saturación de la muestra, previo a la realización del ensayo, sobre la ascensión capilar. Así, luego de 100 días en inmersión tanto la cantidad de agua absorbida como el parámetro *S* de las muestras secadas en estufa, resultaron alrededor de tres veces superiores al de las muestras expuestas en ambiente de laboratorio.



**Figura 2.19:** Influencia del pre-acondicionamiento de las muestras (adaptado de Martys y Ferraris, 1997).

## 2.6.2. Influencia de las condiciones medioambientales y de ensayo

### 2.6.2.1. Temperatura

La variación de *S* con la temperatura es muy gradual y depende de la relación  $(\gamma / \mu)^{1/2}$ , siendo  $\gamma$  y  $\mu$  la tensión superficial y viscosidad del líquido, respectivamente. Así, para el caso del agua un cambio en la temperatura de 10 °C a 30 °C causa un aumento en *S* del 25%. La variación es de aproximadamente 1% / °C (Hall y Hoff, 2002).

Por ello, en laboratorio el ambiente debe acondicionarse a una temperatura regulada, dejando estacionar a las muestras y al líquido de ensayo el tiempo suficiente para alcanzar dicha temperatura. En general se suele efectuar el ensayo bajo condiciones de laboratorio, es decir a una temperatura de 20 °C, debiéndose informar cuando se lo realice a otra temperatura. Algunos investigadores (Hall y Hoff, 2002) proponen efectuar correcciones cuando el ensayo se realice a una temperatura  $T$ , diferente a la estándar  $T_0$  (usualmente 20 °C) mediante la expresión  $S_0 = S (\eta_0 \cdot \gamma_T / \eta_T \cdot \gamma_0)^{1/2}$ .

### 2.6.2.2. Superficie de apoyo

La muestra debe colocarse sobre apoyos preferentemente puntuales, de modo que permitan el libre acceso del agua a través de la superficie de afluencia. Existen muchas variantes, por ejemplo el empleo de varillas o clavijas (Hall, 1989), el uso de esponjas como superficie de apoyo (Dias, 2000) e incluso la utilización de una balanza de la cual se suspende la muestra de manera de obtener un registro continuo del incremento de masa durante el ensayo (Sabir *et al.*, 1998).

### 2.6.2.3. Líquido de ensayo

Los valores obtenidos del parámetro  $S$  difieren dependiendo del líquido empleado, así cuanto mayor es la tensión superficial del líquido mayor será el volumen absorbido, para una misma profundidad de penetración. La mayor tensión superficial del líquido provoca una mayor presión capilar que comprime el aire contenido en los poros (Sosoro, 1998).

Usualmente se emplea agua como líquido de ensayo, aunque existen evidencias del empleo de fluidos orgánicos (Sosoro, 1998; Taylor *et al.*, 1999; Hall y Hoff, 2002; Hanžič e Ilić, 2003). Dichos líquidos se ajustan adecuadamente a la ley de  $i$  vs.  $t^{1/2}$ , aunque se ha observado cierta desviación al comportamiento lineal cuando se trabaja con agua (Fig. 2.20).

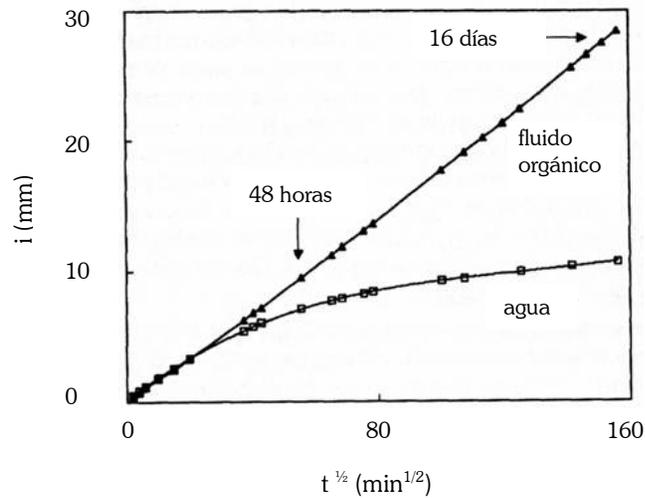


Figura 2.20: Influencia del líquido de ensayo (Taylor *et al.*, 1999).

Tal comportamiento "anómalo", fue atribuido a una nueva hidratación de la pasta de cemento cuando la misma se pone en contacto con el agua, la cual no se presenta durante las primeras horas de ensayo sino que tiene lugar a tiempos mayores (Hall y Hoff, 2002). Sin embargo, dicho comportamiento puede deberse a la falta de consideración de los efectos de superficie cuando la muestra es inicialmente puesta en contacto con agua, y al hecho de que los poros más pequeños probablemente controlen la succión capilar a edades más avanzadas (Martys y Ferraris, 1997).

Según Sosoro (1998), pueden producirse reacciones químicas entre el hormigón y el líquido de ensayo, que derivan en una desviación del comportamiento lineal y consecuentemente en una reducción del parámetro  $S$ . Dicho investigador al emplear agua, observó que el apartamiento de la linealidad durante los primeros instantes del ensayo se debía a la rehidratación y expansión consecuencia del mojado, mientras que para tiempos mayores, a la disolución del CH de la matriz de cemento. Sin embargo, al emplear fluidos orgánicos capaces de disolver dicho compuesto, como el etilenglicol, se observó que tanto para los primeros instantes del ensayo como para los tiempos mayores, el apartamiento al

comportamiento lineal era consecuencia de la disolución del CH. A su vez, verificó que la desviación experimentada se hacía más pequeña en muestras secadas a 65 °C respecto de aquellas en las cuales el secado se llevó a cabo a 105 °C.

Respecto a la profundidad de inmersión, la muestra se coloca sobre apoyos en un recipiente conteniendo el líquido, de manera que la cara de ensayo quede adecuadamente en contacto con él y sumergida unos pocos milímetros de profundidad. Si bien existen trabajos que dan testimonio del empleo de niveles próximos a los 10 mm (Eperjesi *et al.*, 1998; Camarini *et al.*, 1999; Bardella *et al.*, 2005), se recomienda que dicho nivel no supere los 5 mm por sobre la base de la muestra (Hall, 1989). Es conveniente la inmersión de la cara de ensayo entre 2 y 5 mm de profundidad, con el fin de minimizar el efecto del llenado de los poros abiertos sobre la superficie de afluencia y a lo largo de los lados de las caras adyacentes (Sabir *et al.*, 1998).

Un aspecto a destacar es el hecho de que el nivel de agua deberá permanecer constante durante el transcurso del ensayo, siendo aconsejable el empleo de un recipiente grande con el fin de minimizar los cambios en el nivel de agua durante el ensayo (Hall y Hoff, 2002).

#### **2.6.2.4. Edad de ensayo**

Conforme aumenta la edad del hormigón se produce una reducción en la absorción de agua por capilaridad, consecuencia de la evolución en la hidratación del cemento. Factores como el tipo de curado y la carbonatación se encuentran directamente vinculados con tal parámetro.

En hormigones sometidos a diferentes condiciones de curado, se encontró que el incremento de la velocidad de succión capilar de hormigones convencionales curados en ambiente seco respecto al curado húmedo se redujo

con la edad, mientras que en el caso de hormigones elaborados con ceniza volante se observó un incremento (Golapan, 1996).

Por otro lado, en otras investigaciones se atribuyó la reducción de la succión capilar en el tiempo a la carbonatación de la pasta de cemento, fenómeno que provoca una disminución del volumen de poros por la formación y depósito del carbonato de calcio en el interior de los mismos (Dias, 2000).

Al respecto, se evaluaron muestras curadas durante 28 días en cámara húmeda y en ambiente de laboratorio y posteriormente estacionadas durante 4 años en esta última condición. Se observó que todas las muestras experimentaron un incremento de peso y una reducción de  $S$ , siendo estos cambios mayores en el caso de las muestras curadas al aire cuyo valor de  $S$  fue originalmente superior. Esto fue directamente atribuido a la carbonatación de la zona superficial.

Ensayos sobre estructuras existentes confirmaron luego que la reducción de  $S$  con la edad tuvo su causa en la carbonatación superficial, obteniéndose velocidades de succión capilar inferiores en las muestras externas carbonatadas, respecto a las del hormigón interior no carbonatadas.

Por ello, se sugiere que la magnitud de la carbonatación de las estructuras deba ser tomada en cuenta al evaluar la calidad del hormigón superficial a través del ensayo de succión capilar. Además dependiendo del nivel de carbonatación, hormigones más pobres o sometidos a un curado húmedo menos prolongado, podrían presentar menores valores de succión capilar (González *et al.*, 2003).

### 2.6.2.5. Curado

El curado es una operación indispensable para el desarrollo de resistencia del hormigón, y constituye junto con la razón a/c uno de los principales factores determinantes del comportamiento durable.

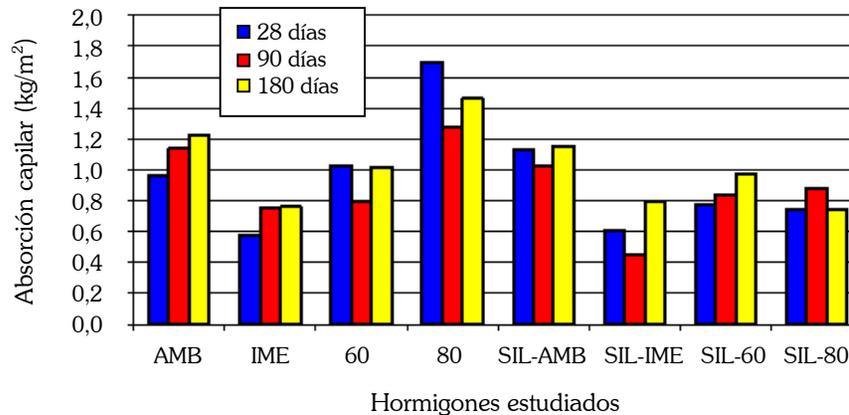
Es conocido el hecho de que hormigones curados bajo condiciones propicias de humedad y temperatura (curado húmedo), presentan un adecuado desempeño resistente y durable debido al óptimo desarrollo de los productos de hidratación del cemento. Por el contrario, el curado seco crea un volumen de poros mayor generando poros de tamaño superior, debido al cese en la hidratación por la falta de suministro de agua.

Bardella *et al.* (2005) trabajaron con dos grupos de hormigones elaborados con cemento de alta resistencia inicial, empleando en uno de ellos sílica fume como reemplazo del 10% del cemento (*SIL*). Ambos grupos fueron sometidos a tres condiciones diferentes de curado: un curado al aire en ambiente de laboratorio (25 °C y 65% HR), un curado por inmersión en agua saturada con cal durante 7 días y el tiempo restante hasta la edad de ensayo en ambiente de laboratorio, y curado en cámara térmica (60 °C y 80 °C) de vapor a presión atmosférica.

La succión capilar fue caracterizada a través de un coeficiente calculado a 24 h sobre muestras de 28, 90 y 180 días de edad. El mejor comportamiento en cada grupo fue exhibido por los hormigones curados en inmersión (*IME*), mientras que en el caso de los elaborados sin sílica fume, los hormigones curados en ambiente de laboratorio (*AMB*) y los curados térmicamente a 80 °C (*SIL-80*), presentaron comportamientos deficientes (Fig. 2.21).

El curado por inmersión arrojó los mejores resultados debido a las condiciones óptimas de humedad y temperatura para el desarrollo de los productos de hidratación, evitando de este modo la pérdida del agua necesaria para el

avance de dicho proceso. Por otro lado, el curado térmico provocó un crecimiento desordenado de los compuestos hidratados, ocasionando un aumento en la porosidad de la pasta de cemento. Cuanto mayor fue la temperatura de curado tanto mayor resultó este efecto.



**Figura 2.21:** Influencia del tipo de curado sobre la succión capilar (Bardella *et al.*, 2005).

La duración y el tipo de curado afecta de diferente forma al comportamiento resistente y durable del hormigón (Tasdemir, 2003). Dicho autor encontró que a medida que se incrementaba la resistencia a compresión,  $S$  decrecía significativamente en hormigones curados durante 28 días al aire con una humedad relativa del  $65 \pm 5\%$  y a una temperatura de  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ .

En el caso de hormigones curados durante 7 días a  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ , protegidos por una lámina de polietileno, recubiertos por una arpillera húmeda y mantenidos los restantes 21 días al aire, se encontró que  $S$  también decrecía con el incremento de la resistencia, pero en una forma más leve. Sin embargo, en el caso de los hormigones curados bajo inmersión en una disolución saturada de cal a  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ ,  $S$  permaneció casi constante con el incremento de la resistencia a compresión.

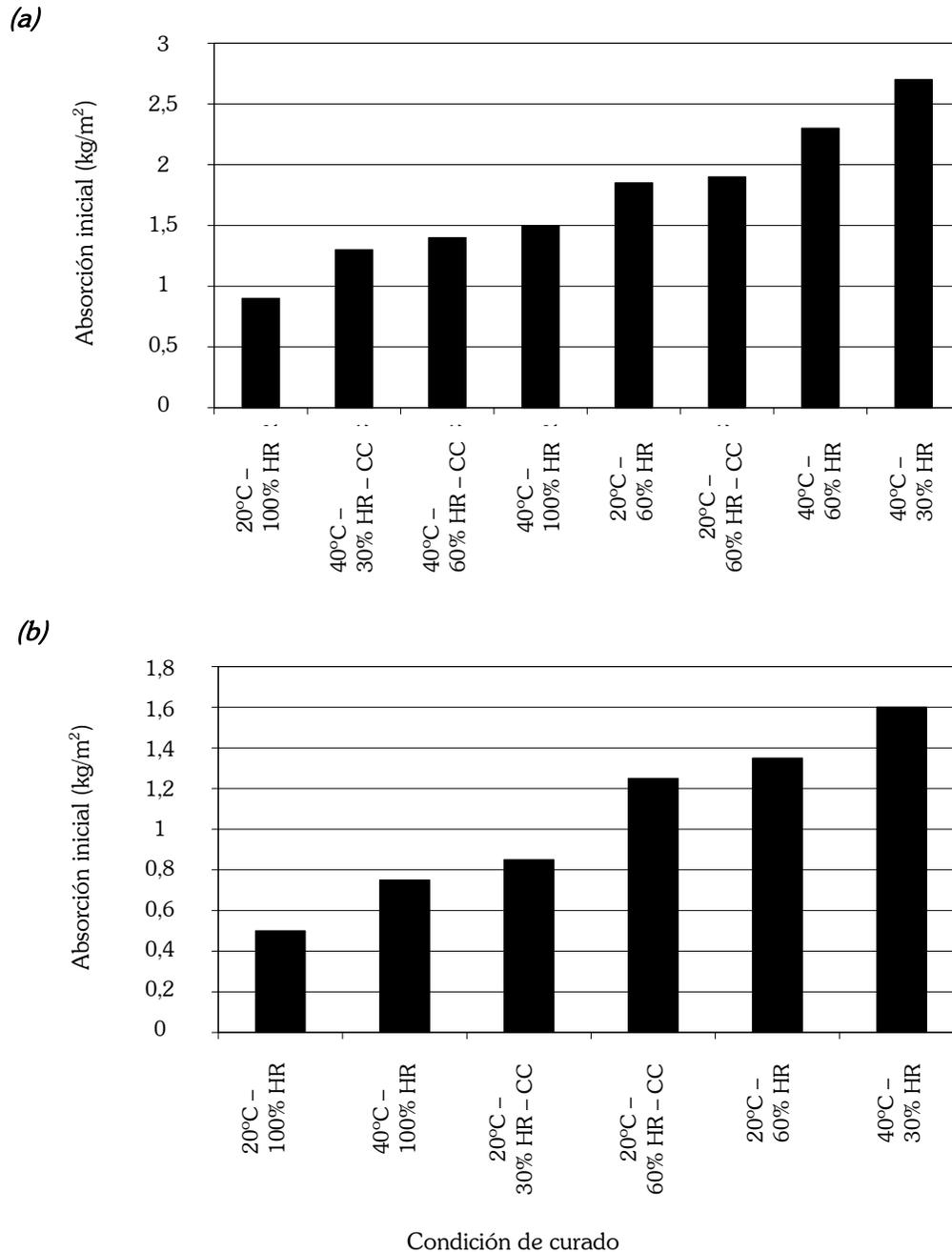
Por otro lado, Kockal y Turker (2007) estudiaron hormigones de diferente nivel resistente (20, 40 y 60 MPa) sometidos a distintas condiciones de curado,

sobre los cuales se determinaron a distintas edades (28, 56 y 90 días) los coeficientes de succión capilar de agua a 24 h. Se observó que para todas las edades evaluadas dichos coeficientes resultaron mayores en los hormigones estacionados en ambiente natural, respecto a los que permanecieron en laboratorio, evidenciándose incluso una mayor humedad relativa promedio en este último ambiente. Por el contrario, los resultados de resistencia a compresión evidenciaron una tendencia general contrapuesta. Las diferencias en los coeficientes de succión capilar entre ambas condiciones de exposición se hicieron pequeñas en el tiempo sólo para los hormigones de 20 MPa de nivel resistente.

González *et al.* (2003) al estudiar la efectividad del tiempo de curado propuesto por el Proyecto de Reglamento CIRSOC 201 en hormigones elaborados con diferentes tipos de cemento, observaron que los hormigones de razones  $a/c > 0,50$  fueron los más susceptibles a la pérdida de agua por intercambio con el medio ambiente, por ello los valores de velocidad y capacidad de succión resultaron afectados por el tiempo de curado.

Camarini *et al.* (1999) observaron que al curar hormigones con contenidos del 12 y 25% de filler como reemplazo del cemento, se produjo una reducción en la absorción con el incremento en la humedad ambiente, independientemente de la temperatura. Lo contrario sucedió al incrementarse la temperatura manteniendo constante la humedad relativa. Las altas temperaturas de curado incrementaron la cantidad de poros capilares grandes, resultando éstos más grandes en el caso de los hormigones con mayor contenido de filler calcáreo.

En el caso del hormigón con 25% de filler calcáreo (Fig. 2.22a) bajo un curado a 20 °C, el incremento de la humedad relativa ambiente del 60% al 100% produjo reducciones en la absorción inicial de agua del 200%, mientras que para una temperatura de 40 °C, la reducción fue del 55%. Cuando la humedad relativa se incrementó del 30 al 100%, para esta última temperatura se observó una disminución del 82%.



**Figura 2.22:** Influencia de la humedad relativa y temperatura ambiente sobre la absorción inicial de hormigones elaborados con filler calcáreo **(a)** 25% y **(b)** 12% (adaptado de Camarini *et al.*, 1999).

En el caso del hormigón con 12% de filler (Fig. 2.22b), el aumento de la humedad relativa del 60 al 100% redujo la absorción inicial un 250% cuando la

temperatura de curado fue de 20 °C, mientras que dicha reducción resultó del 210% para una temperatura de 40 °C, al incrementarse la humedad relativa del 30 al 100%.

En ambos tipos de hormigones al incrementarse la temperatura de curado de 20 a 40 °C, se observó un aumento del agua absorbida. La alta temperatura sobre la superficie del hormigón resultó en una estructura no uniforme con más poros capilares.

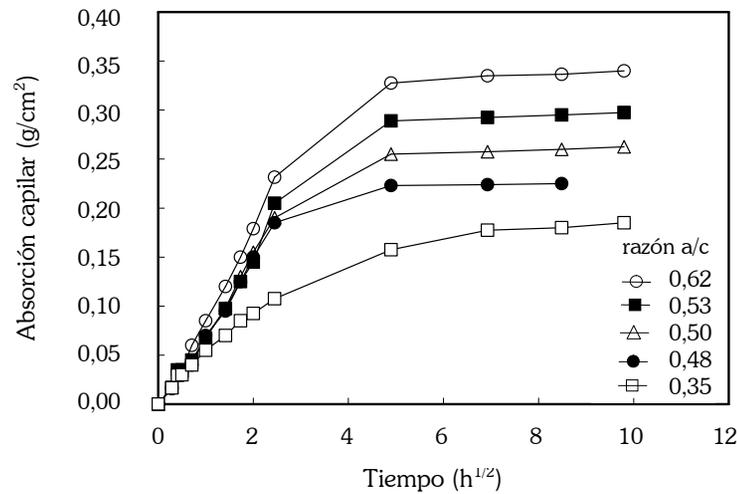
Además, los autores evaluaron la influencia del empleo de membranas de curado (*CC*), encontrando que la aplicación de dicho producto resultó más efectiva bajo condiciones ambientales que favorecen el secado superficial del hormigón, es decir alta temperatura y baja humedad relativa ambiente.

### **2.6.3. Influencia de las características composicionales del hormigón**

#### **2.6.3.1. Razón a/c - Contenido unitario de agua y cemento**

La razón a/c constituye uno de los principales factores determinantes del comportamiento durable de las estructuras de hormigón armado. La absorción de agua por capilaridad constituye un parámetro de durabilidad y por ello se verá directamente afectada por dicho factor.

González *et al.* (2003) observaron que a medida que aumentaba la razón a/c, la pendiente de la curva de absorción en función de la raíz cuadrada del tiempo se hacía más abrupta y la capacidad de absorción capilar crecía (Fig. 2.23). Esto último fue atribuido al aumento de la porosidad interconectada del hormigón, que aumenta la velocidad de penetración del agua. En hormigones bien curados la capacidad de succión resultó proporcional a la razón a/c.



**Figura 2.23:** Influencia de la razón a/c sobre la succión capilar (adaptado de González *et al.*, 2003).

Similar comportamiento fue advertido por Kolia y Gergiou (2005) al estudiar hormigones de diferentes razones a/c con distintos contenidos unitarios de cemento y agua. Además de corroborarse el incremento de la succión capilar con el aumento de la razón a/c, se observó que en los casos en que se mantuvo la razón a/c constante, se produjo un incremento en la resistencia y una reducción en la succión capilar cuando el volumen de agua o el de pasta disminuía.

Se detectó además, un incremento en la absorción en forma aproximadamente lineal a medida que el contenido de pasta aumentaba, reflejando el hecho de que la pasta resulta más porosa que los agregados y por ende existe mayor absorción de agua. Los cambios en la velocidad de absorción para un dado cambio en el contenido de pasta, resultaron menores cuanto menor fue la razón a/c, consecuencia de la disminución de la porosidad de la pasta conforme decrecía la razón a/c.

Kockal y Turker (2007) también observaron la dependencia de la succión capilar con la razón a/c y con el contenido total de agua. Dichos autores

encontraron que para un nivel resistente de 20 MPa, el mayor coeficiente de succión capilar fue obtenido en hormigones con mayor contenido total de agua, no resultando necesariamente los de mayor razón a/c. Por otro lado, el menor coeficiente fue obtenido en los hormigones de menor razón a/c y de menor contenido total de agua.

### 2.6.3.2. Tipos de cemento - Adiciones

La influencia del empleo de adiciones minerales sobre el mecanismo de transporte por succión capilar depende entre otros factores de sus características intrínsecas, del porcentaje de reemplazo, del tipo y duración de curado, y del pre-acondicionamiento de las muestras (más específicamente de la temperatura de secado). Por ello resulta necesaria una evaluación exhaustiva de cada caso en particular.

Para Khatib y Mangat (1995) el reemplazo del 22% de cemento por ceniza volante no tuvo una influencia significativa en la succión capilar, mientras que hormigones con reemplazos del 9% de humo de sílice en la mayoría de los casos presentaron valores de  $S$  mayores que los elaborados sin ningún tipo de adición, debido a que la misma produce una porosidad abierta más grande (Fig. 2.17). Esto último fue estudiado en trabajos previos realizados por los mismos autores sobre pastas conteniendo también 9% de humo de sílice como reemplazo del cemento, en cuyos estudios se detectó, mediante porosimetría por intrusión de mercurio, un mayor volumen de poros respecto al de las pastas patrones.

Por el contrario, Bardella *et al.* (2005) observaron que hormigones elaborados con 10% de humo de sílice como sustitución del cemento, presentaban una pequeña mejora en el comportamiento por succión capilar comparados con aquellos hormigones sin dicha adición. Esto fue atribuido a la formación de C-S-H adicional liberado por la reacción puzolánica de hidratación de la adición.

En concordancia con lo anterior, se encontró que el empleo de material puzolánico muy fino (como el humo de sílice) disminuyó la absorción capilar, siendo esta reducción más significativa en las primeras edades atenuándose su influencia en el tiempo (Kockal y Turker, 2007).

Por otro lado, hormigones elaborados con reemplazos del cemento del 70% y 20% de escoria y ceniza volante respectivamente, a la edad de 91 días evidenciaron una significativa reducción en la absorción, confirmándose el efecto benéfico de las adiciones minerales en el hormigón (Cantarelli *et al.*, 2005).

De acuerdo a los estudios de Golapan (1996) la adición de ceniza volante influye sobre la succión capilar, la cual depende fuertemente de la condición de curado. Se observó que los hormigones sometidos a un curado seco, presentaron mayores valores de succión que los curados en ambiente húmedo. Se encontró que bajo un curado húmedo, los hormigones con ceniza presentaron menores valores de  $S$  que los elaborados sin esta adición. Sin embargo, cuando aquellos fueron curados en un ambiente con humedad relativa del 50% (curado seco), los valores de succión resultaron mayores que los de los hormigones patrones.

Dicho investigador destaca la susceptibilidad al curado de los hormigones con adiciones. Así, con un adecuado curado un hormigón con 40% de ceniza volante redujo el valor de  $S$  en un 37%, mientras que un curado inadecuado lo incrementó un 60%. La influencia del curado sobre los hormigones elaborados con cemento normal (sin adiciones) fue mucho menor. También se observó que el parámetro  $S$  de los hormigones con ceniza volante debido a un curado inapropiado, aumentó conforme lo hizo el contenido de dicha adición y la edad.

Tasdemir (2003) trabajó con hormigones elaborados con: cemento portland normal sin adiciones, cementos del tipo compuesto con 15 y 40% de puzolana aproximadamente, y con hormigones con cemento normal a los cuales les sustituyó

como reemplazo del 10% en peso del cemento, distintas adiciones (ceniza volante, humo de sílice y filler del tipo silíceo y calcáreo).

Los mayores valores de succión evaluados a la edad de 28 días, fueron hallados en los hormigones elaborados con ceniza volante, sin embargo el autor destaca que sería esperable que dicha adición desarrollara su potencial acción puzolánica a través del tiempo. El mejor comportamiento fue observado en los hormigones elaborados con humo de sílice y filler del tipo calcáreo, lo cual fue atribuido a la alta finura de este tipo de adiciones que provoca el refinamiento de los capilares de la pasta de cemento y de la zona de interfase pasta-agregado. Además del efecto físico de relleno, en el caso del humo de sílice se suma el efecto químico producido por una temprana reacción puzolánica. En el caso de los hormigones elaborados con cemento compuesto, el de mayor succión capilar resultó el constituido por 40% de puzolana.

Respecto al comportamiento de hormigones elaborados con escoria y puzolana, Eperjesi *et al.* (1998) elaboraron hormigones de distinta razón agua/ligante (0,37, 0,50 y 0,66), empleando como reemplazo del 30% en peso del cemento escoria granulada de alto horno y puzolana natural. Se observó que para cada razón agua/ligante (a/l) los valores de absorción capilar de los hormigones elaborados con adiciones resultaron menores que en los de referencia, en los cuales no se utilizó ningún tipo de adición. En los hormigones con adiciones activas, el incremento de la porosidad capilar debido a un aumento de la razón a/l se vio disminuido por la reacción puzolánica, que provocó un refinamiento de poros y una segmentación de la red capilar. De acuerdo a estas experiencias para igual razón a/l, el empleo de adiciones activas mejora la calidad del hormigón de recubrimiento.

Menéndez *et al.* (2002) estudiaron el comportamiento de hormigones elaborados con cementos binarios con contenidos del 12% y 18% de filler (*C12F* y *C18F*) y 20% de escoria (*C20E*). También se evaluó el empleo de cementos

ternarios con combinaciones del 12 y 10%, 12 y 20%, y 18 y 20% de filler y escoria, respectivamente (*C12F10E*, *C12F20E* y *C18F20E*). En la Tabla 2.3 se presentan los valores de *S* para las distintas mezclas evaluadas.

**Tabla 2.3:** Tasa de succión capilar de hormigones elaborados con cementos binarios y ternarios (adaptado de Menéndez *et al.*, 2002).

Edad (días)	<i>S</i> [g/(cm <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )]						
	<i>CP</i>	<i>C12F</i>	<i>C18F</i>	<i>C20E</i>	<i>C12F10E</i>	<i>C12F20E</i>	<i>C18F20E</i>
3	0,2219	0,2136	0,2562	0,2880	0,2084	0,2359	0,2488
7	0,1807	0,1258	0,2018	0,2136	0,1466	0,1940	0,1992
28	0,1004	0,0932	0,1426	0,0974	0,1109	0,1127	0,1262
90	0,0807	0,0633	0,1161	0,0682	0,0685	0,0497	0,0612
360	0,0805	0,0650	0,0951	0,0619	0,0627	0,0469	0,0615

Dichos investigadores observaron que la incorporación de filler contribuyó a una mejor hidratación temprana del clinker, sin embargo establecieron la necesidad de limitar la cantidad incorporada al 10%, debido a que un porcentaje mayor incrementa tanto la cantidad de agua absorbida como los valores de *S*. La escoria produjo similar efecto pero a edades más avanzadas al obtener una menor tasa de succión capilar. Como la acción de estas dos adiciones es complementaria, los mejores comportamientos fueron observados en las mezclas ternarias. En éstas últimas, para igual contenido de filler, el incremento en el porcentaje de escoria aumentó tanto la cantidad de agua absorbida como *S* (hasta los 28 días). Lo mismo sucedió a cualquier edad, cuando para igual contenido de escoria se incrementó la cantidad de filler.

Los valores de *S* resultaron en todos los casos inferiores a los del hormigón patrón elaborado con cemento portland normal (*CP*), a excepción del hormigón elaborado con cemento con 18% de filler.

### 2.6.3.3. Aditivos

El empleo de aditivos del tipo plastificante e incorporador de aire modifica las características de absorción de los hormigones con ellos elaborados, tanto al utilizar agua o fuel oil como líquido de ensayo (Hanžič e Ilić, 2003). Las mayores absorciones fueron registradas en los hormigones patrones sin aditivo, sin embargo al comparar las mezclas con aditivos, se observó que los hormigones con aire intencionalmente incorporado absorbieron más agua que los elaborados con plastificante, pero la altura del perfil de agua que adquirieron ambos hormigones (medida mediante radiografías neutrónicas), fue prácticamente similar.

Según lo observado por estos investigadores, las burbujas de aire permiten incrementar el volumen del líquido absorbido, pero simultáneamente provocan un decrecimiento en la velocidad de succión debido a la desconexión que produce el agente incorporador sobre la red de poros capilares.

### 2.6.3.4. Tipos de agregados

En estudios llevados a cabo sobre hormigones elaborados con distintos tipos de agregado grueso como grava natural, piedra partida granítica y piedra partida cuarzo-dolomítica, manteniendo prácticamente constantes las granulometrías y proporciones de los distintos materiales componentes, no se encontró una influencia significativa del tipo de agregado sobre el mecanismo de transporte por succión capilar (Mc Carter *et al.*, 1996). Este comportamiento fue sustentado en el hecho de que el volumen de la pasta de cemento es quien controla las características de absorción y que parámetros como el tamaño de poros, su distribución y conectividad juegan el rol más importante.

## Capítulo 3

---

### *El Método Gravimétrico Directo*

### 3.1. Introducción

El estudio del movimiento de un líquido por capilaridad en materiales porosos basado en un análisis puramente teórico del fenómeno, conduce a expresiones que permiten el cálculo de la altura del perfil de penetración y de la velocidad de ascensión del líquido en la muestra de ensayo.

Sin embargo, dichas expresiones suponen varias hipótesis simplificadoras las cuales se alejan de las condiciones reales o no contemplan ciertos aspectos tales como las características tecnológicas del material ensayado, su estructura porosa, en lo que hace al tamaño y distribución de poros, su estado de humedad inicial y las condiciones medioambientales, entre las más importantes.

Por ello, para obtener con cierta confiabilidad los parámetros que representan al fenómeno estudiado, se requieren de técnicas experimentales cuyos resultados se sustenten en una base empírica y que contemplen los aspectos antes mencionados.

Como fuera comentado en el *Capítulo 2*, existen varias técnicas que permiten cuantificar el movimiento de agua por capilaridad. Sin embargo, algunas de las metodologías de ensayo requieren equipamientos especiales de costosa adquisición, sumado al hecho de que por tratarse de técnicas muy particulares los parámetros obtenidos no presentan carácter comparativo.

El método gravimétrico directo aparece como la metodología de ensayo más simple, práctica y económica, respecto de otras técnicas de ensayo. Dicha metodología se presenta como la más difundida, adoptada por la mayoría de las normas internacionales que regulan la medición de la absorción de agua por capilaridad, como parámetro de caracterización del hormigón desde el punto de vista durable.

En el presente capítulo se expone el fundamento teórico sobre el cual se sustenta la técnica y se desarrollan las expresiones que mejor representan el movimiento de un líquido por capilaridad en materiales poros.

### 3.2. Modelización del movimiento de agua por capilaridad – Fundamento del método

El modelo de transporte de líquidos por capilaridad de mayor difusión existente en la literatura, aplicable a materiales cementíceos, lo constituye el propuesto por Hall (1989), el cual toma como base las expresiones desarrolladas por Darcy para el caso de flujo insaturado y la aplicación de la ecuación de Richards para el caso de absorción unidimensional en un material semi-infinito.

La propiedad fundamental referente a la absorción y transmisión de un líquido a través de un medio poroso es la *difusividad hidráulica*  $D$ , la cual constituye el fundamento de la *sorptividad*  $S$  (*sorptivity*). Sin embargo como su determinación es larga y tediosa, el modelo desarrollado por Hall propone trabajar con  $S$  debido a que es de fácil determinación experimental.

El movimiento de un líquido a través del interior de un material poroso debido a la acción de las fuerzas capilares, es descrito mediante la ley extendida de Darcy por el vector velocidad de flujo  $q$ , dado por la siguiente expresión:

$$\text{Ec. (3.1)} \quad q = K(\theta) \cdot F(\theta)$$

donde:

$\theta$ : contenido de agua del material poroso

$K(\theta)$ : conductividad hidráulica

$F(\theta)$ : fuerza capilar

El contenido de agua en el material poroso  $\theta$ , representa el volumen relativo del líquido contenido en el material, referido al volumen sólido. Tanto  $K$  como  $F$  dependen de  $\theta$ .

El parámetro  $K(\theta)$  se refiere a la permeabilidad pero en estado "no saturado", para diferenciarla de la permeabilidad saturada se utiliza el concepto de *conductividad hidráulica*.

La fuerza capilar corresponde al gradiente negativo del potencial capilar o succión  $\psi$ , es decir:

$$F = -\nabla\Psi(\theta)$$

El concepto de potencial capilar fue desarrollado por Buckingham para su aplicación en la Mecánica de Suelos, el cual se define como el trabajo que es necesario realizar para extraer el agua del suelo hasta un plano de referencia, es decir da una idea de la fuerza de retención del agua en el terreno.

La Ec. (3.1) puede escribirse como:

$$\text{Ec. (3.2)} \quad q = -K(\theta) \cdot \nabla\Psi(\theta)$$

que para el caso de flujo unidireccional queda:

$$\text{Ec. (3.3)} \quad q = -K(\theta) \cdot \frac{d\Psi}{dx} = -K(\theta) \cdot \frac{d\Psi}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dx}$$

llamando:

$$\text{Ec. (3.4)} \quad D(\theta) = K(\theta) \cdot \frac{d\Psi}{d\theta}$$

la Ec. (3.3) quedará de la forma:

$$\text{Ec. (3.5)} \quad q = -D(\theta) \cdot \frac{d\theta}{dx}$$

$D(\theta)$  representa la *difusividad capilar*, la cual depende tanto del material como del fluido, y describe la tendencia de un material poroso a transmitir un fluido por capilaridad. Como habitualmente el fluido es agua, a  $D$  se la denomina comúnmente *difusividad hidráulica*.

Por lo tanto para calcular la velocidad de flujo  $q$  (Ec. 3.5) es necesario conocer la difusividad hidráulica  $D(\theta)$ , para lo cual se requiere conocer simultáneamente  $K(\theta)$  y  $F(\theta)$  (Ec. 3.4).

La ecuación extendida de Darcy es válida sólo para régimen estacionario, y como el contenido de agua  $\theta$  cambia a través del tiempo, resulta necesario considerar esta variación, para lo cual se hace uso de la ecuación de continuidad dada por:

$$\text{Ec. (3.6)} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x}$$

que expresada de otro modo conduce a la ecuación de Richards:

$$\text{Ec. (3.7)} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( D \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)$$

Esta expresión permite modelar el flujo no permanente, en medios porosos no saturados.

Si se imponen las siguientes condiciones de borde:

1)  $\theta = \theta_s$ ,  $x = 0$ ,  $t \geq 0$  (el medio poroso se encuentra saturado sólo en la cara en contacto con el líquido para tiempos iguales o mayores al instante inicial del contacto entre el medio poroso y el líquido).

2)  $\theta = \theta_d$ ,  $x > 0$ ,  $t = 0$  (en el instante inicial del contacto entre el medio poroso y el líquido, aquél se encuentra en estado seco a excepción de la cara de contacto).

Bajo estas condiciones la solución a la Ec. (3.7), considerando al coeficiente  $D$  independiente de la profundidad resulta:

$$\text{Ec. (3.8)} \quad x(\theta, t) = \phi(\theta) \cdot t^{1/2}$$

Esta ecuación indica que a medida que el agua es absorbida por un medio poroso inicialmente seco, todos los puntos del perfil húmedo avanzan con  $t^{1/2}$ .

La cantidad total de agua absorbida  $i$ , en el tiempo  $t$ , estará dada por:

$$\text{Ec. (3.9)} \quad i = \int_{\theta_d}^{\theta_s} x d\theta = t^{1/2} \int_{\theta_d}^{\theta_s} \phi(\theta) d\theta$$

llamando: 
$$S = \int_{\theta_d}^{\theta_s} \phi(\theta) d\theta$$

la Ec. (3.9) queda expresada como:

$$\text{Ec. (3.10)} \quad i = S \cdot t^{1/2}$$

donde:

$i$ : cantidad acumulada de agua absorbida por unidad de área, ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ )

$S$ : sorptividad, [ $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$ ]

$t$ : tiempo de inmersión, (min)

Como fuera comentado en el *Capítulo 2*, esta expresión desarrollada por Hall (1989), considera que durante el ensayo el volumen acumulado de líquido absorbido por unidad de área de afluencia  $i$ , se incrementa con la raíz cuadrada del tiempo de inmersión, siendo  $S$  la *sorptividad* o *sorptivity* del material. Dicho parámetro representa la propiedad del material de transmitir un líquido a través de su estructura porosa por capilaridad y su magnitud corresponde al valor de la pendiente obtenida al graficar  $i$  vs.  $t^{1/2}$ .

En la práctica los puntos experimentales se ajustan a una expresión del tipo:

$$\text{Ec. (3.11)} \quad i = A + S \cdot t^{1/2}$$

donde:

$A$ : ordenada al origen, ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ ).

La ordenada al origen  $A$ , es un valor finito de intersección sobre el eje  $i$  pequeño y positivo, atribuido al llenado de los poros abiertos sobre la superficie de afluencia y a lo largo de los lados de las caras adyacentes (Hall, 1989). Esta intersección no afecta los resultados, ya que el origen y frecuentemente las lecturas a edades tempranas no son consideradas como puntos experimentales para definir  $S$ . Con el fin de minimizar este efecto, se sugiere que la muestra sea sumergida entre 2 y 5 mm (Sabir *et al.*, 1998).

La dependencia de  $i$  con la raíz cuadrada del tiempo se da para edades tempranas. A tiempos mayores (del orden de las decenas de días), se produce un cambio en el régimen y la tasa de absorción capilar decae. Para tiempos del orden de los 100 días, se produce un pequeño ascenso atribuido a los poros del gel. A partir de ese instante la absorción capilar pasa a depender de la raíz cuadrada del tiempo, pero con una tasa de absorción mucho menor (Martys y Ferraris, 1997).

Si bien es esperable que la desviación de la linealidad no ocurra, fundamentalmente durante los primeros instantes del ensayo, puede suceder que el incremento de masa por unidad de área en función de la raíz cuadrada del tiempo presente cierta curvatura. Las causas por las cuales puede no observarse una clara linealidad entre  $i$  y  $t^{1/2}$  pueden deberse a (Hall y Hoff, 2002):

- 1) contenido inicial de agua no uniforme
- 2) flujo de agua dentro del material no unidimensional
- 3) material no homogéneo
- 4) material estructuralmente y microestructuralmente alterado por cambios en el contenido de agua.

Lograr un contenido uniforme de agua en todo el espesor de la muestra resulta dificultoso, de allí la importancia de seguir un estricto proceso de pre-acondicionamiento. En cuanto a la condición 2, mediante la impermeabilización lateral se pretende generar una geometría tal que permita el ingreso del flujo en forma unidireccional impidiendo la afluencia radial del líquido.

En cuanto a la condición 3, si bien es sabido que el hormigón es un material esencialmente heterogéneo, es posible minimizar este hecho ensayando muestras con un área transversal mínima, de manera tal que la misma pueda constituirse en representativa de toda la masa. Al respecto, la norma IRAM establece el empleo de muestras cilíndricas de 100 mm y 150 mm de diámetro, cuando la totalidad del agregado grueso del hormigón pase por el tamiz IRAM 26,5 mm y 37,5 mm, respectivamente.

Se ha observado que la absorción capilar en materiales cementíceos obedece a la ley  $i-t^{1/2}$  en forma bastante ajustada, tanto cuando se trabaja con agua como con solventes orgánicos. Sin embargo, se ha detectado una clara desviación del comportamiento lineal al emplearse agua como líquido de ensayo (Hall y Hoff, 2002; Hanžič e Ilić, 2003), debido a que el mojado puede producir marcados

cambios en la microestructura de los cementos. Este hecho hace suponer que la condición 4 es factible de presentarse.

Esta reactividad ante la presencia de agua se ha sustentado en el análisis microestructural, llevado a cabo con el microscopio electrónico de barrido. Mediante el mismo se pudo evidenciar cierta alteración sufrida por la pasta de cemento al humedecerse, consistente en una rápida expansión e hidratación (Hall y Hoff, 2002). Simultáneamente a la absorción de agua durante el transcurso del ensayo, puede presentarse alguna expansión en la dirección del flujo capilar.

En estudios realizados sobre hormigones elaborados con un 65% de escoria como reemplazo del cemento, se observó un menor apartamiento al comportamiento lineal cuando se empleó agua como líquido de ensayo (Taylor *et al.*, 1999). La absorción capilar de agua en morteros elaborados con cemento compuesto presentó un apartamiento de  $t^{1/2}$  sólo luego de transcurridas 75 h de ensayo. Los resultados concuerdan con el hecho conocido de que la tasa de reactividad a largo plazo de estos cementos es mucho menor que la de los cementos portland normales.

A pesar de la alteración microestructural de la pasta de cemento, los resultados experimentales demuestran que si las condiciones 1, 2 y 3 se satisfacen, entonces la absorción de agua es bien descrita por la ley de  $S$  (Ec. 3.11) incrementándose  $i$  con  $t^{1/2}$  (Hall, 1989; Hall y Hoff, 2002).

Otra de las causas por las cuales puede producirse cierta desviación de la linealidad, se da cuando los efectos gravitatorios en el ascenso capilar no pueden ser despreciados, lo cual se presenta generalmente en materiales con un sistema de poros extremadamente gruesos, como es el caso de hormigones compactados en forma deficiente (Hall y Yau, 1987). Bajo tales circunstancias el parámetro  $S$  no puede calcularse con la expresión dada por la Ec. (3.11), en cuyo caso deberá considerarse el efecto de la gravedad (Hall y Hoff, 2002). En este caso, el potencial

hidráulico  $\psi$  debe ser reemplazado por el potencial total  $\Phi = \psi + Z$ , donde  $Z$  considera los efectos gravitacionales. Así se tendrá:

$$\text{Ec. (3.12)} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(D\nabla\theta) + \frac{\partial K}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

La solución a la Ec. (3.12) obtenida por Philip para el caso de infiltración en suelos, ajustada al caso de ascenso capilar y válida para los primeros momentos de la absorción, está dada por la expresión (Hall y Hoff, 2002):

$$\text{Ec. (3.13)} \quad i = S \cdot t^{1/2} - B \cdot t + C \cdot t^{3/2} + \dots$$

donde:  $B$  y  $C$  son coeficientes.

Sin embargo, y como fuera comentado en el *Capítulo 2*, la gran mayoría de los materiales de construcción porosos, entre los que se encuentra el hormigón, presentan una estructura caracterizada por poros lo suficientemente finos como para tornar dominante el efecto capilar y despreciar los efectos gravitatorios.

## Capítulo 4

---

*Análisis Comparativo de Normas que  
Regulan el Ensayo de Absorción de Agua  
por Capilaridad*

#### 4.1. Introducción

Tal como fuera indicado en el *Capítulo 1*, el diseño de obras de hormigón armado estuvo basado durante mucho tiempo en aspectos estrictamente resistentes. Sin embargo, la evidencia de deterioros estructurales prematuros condujo a una paulatina evolución en los reglamentos y códigos, donde los requerimientos relativos a la durabilidad y vida en servicio fueron cobrando una importancia creciente.

En la actualidad, los reglamentos argentinos y especificaciones como el CIRSOC 201 vigente se encuentran en un nivel prescriptivo tradicional; mientras que los códigos considerados de referencia en el ámbito internacional (Código Modelo CEB-FIP, normas UNE y código ACI) combinan requisitos prescriptivos con prestacionales, teniendo en cuenta parámetros tales como la resistencia mecánica, resistividad eléctrica, absorción capilar, permeabilidad a gases y a líquidos, etc. En este último nivel se encuentra el Proyecto de Reglamento CIRSOC 201: 2005.

En lo concerniente a normas que contemplan el movimiento de agua por capilaridad existen diversos documentos internacionales que regulan este mecanismo de transporte como por ejemplo las normas ASTM C 1585-04 (Estados Unidos), SIA 162/1 (Suiza), DIN 52617 (Alemania), NBN B15-217 (Bélgica), LNEC E-393 (Portugal), ABNT: NBR 9779 (Brasil) y también la norma UNE-EN 772-11 elaborada por el Comité Europeo de Normalización, además de recomendaciones como la RILEM TC 116-PCD; sin embargo cada documento define condiciones de ensayo particulares que dificultan su comparación. En nuestro país, el ensayo de succión capilar no se encontraba reglamentado hasta el año 2004 en que se aprobó la norma IRAM 1871, actualmente en vigencia. El Proyecto de Reglamento CIRSOC 201: 2005 hace mención a este ensayo al establecer  $4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$  como límite de la velocidad de succión capilar para aquellas estructuras expuestas en contacto con el medio externo.

En el presente capítulo se realiza una comparación entre documentos relativos al transporte de agua por capilaridad, vigentes en diferentes países. Se efectúa un análisis comparativo detallando los distintos puntos abordados por los diferentes documentos, estableciendo similitudes y diferencias entre las distintas propuestas. Paralelamente se hacen algunas consideraciones, sugiriendo mejoras y/o cambios que pudieran llevarse a cabo en las normativas desde una visión científica con el fin de contribuir a un progreso en la normalización.

#### 4.2. Análisis y discusión de las propuestas

Se realizará el análisis y discusión de tres propuestas, la norma *IRAM 1871: "Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido"*, la norma *ASTM C 1585: "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concrete"*, vigentes ambas desde 2004, y la recomendación *RILEM TC 116-PCD: "Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability", Part C: Determination of the Capillary Absorption of Water of Hardened Concrete*.

Los tres documentos a discutir presentan entre sí características diferenciadas, por un lado la norma IRAM 1871 es una norma nacional y de relativa reciente aprobación, mientras que la norma ASTM C 1585 si bien data del mismo año presenta una mayor difusión, consecuencia de su amplio alcance internacional. Por otro lado la propuesta RILEM TC 116-PCD envuelve una concepción más integradora, cuyas recomendaciones surgen de un comité de especialistas de distintos países, siendo adoptadas muchas veces como documentos de base por los organismos internacionales de normalización.

#### 4.2.1. Objetivo

Respecto al alcance del método, si bien los tres documentos especifican los lineamientos del ensayo de absorción de agua por capilaridad, sólo las normas IRAM y ASTM definen los parámetros a calcular en cada caso. Así, la norma ASTM establece que el objetivo del ensayo es la determinación de la tasa de succión capilar (sorptivity), y la norma IRAM la velocidad y capacidad de succión. En la recomendación RILEM sólo se realiza una descripción del método experimental para la determinación del ascenso de agua por capilaridad sin detallar metodologías de cálculo de los parámetros del ensayo.

#### 4.2.2. Sector a ensayar

El fenómeno del transporte de agua por succión capilar en un elemento estructural, está directamente relacionado con el hormigón superficial u hormigón de recubrimiento, cuyas características de absorción difieren significativamente de las del hormigón interior. Este hecho es considerado en la norma ASTM, la cual permite distinguir el comportamiento observado al evaluar la absorción a distintas profundidades desde la cara externa de la probeta o testigo.

Sin embargo, la norma IRAM es muy explícita al aclarar el sector de la probeta o testigo sobre el cual se debe realizar el ensayo. En el caso de probetas, las muestras deben ser extraídas a una distancia de 30 mm de la base del molde constituyéndose ésta en la cara de ensayo (Fig. 4.1a), mientras que en el caso de los testigos, por tratarse de elementos extraídos de estructuras existentes, la cara de ensayo resulta la exterior en contacto con el medio circundante (Fig. 4.1b).

La recomendación RILEM establece que la cara de ensayo de la muestra debe ser la adyacente al fondo del molde, a diferencia de la norma IRAM que obliga a desechar la rodaja de 30 mm de espesor por encontrarse “alterada” debido al contacto con el molde. Cabe destacar que la recomendación RILEM

establece la colocación de un film de polietileno para evitar el engrasado de la cara de ensayo, aunque esto último no exime a la muestra de presentar cierto “efecto de borde”. Dicha recomendación contempla también la realización del ensayo sobre testigos extraídos de estructuras.

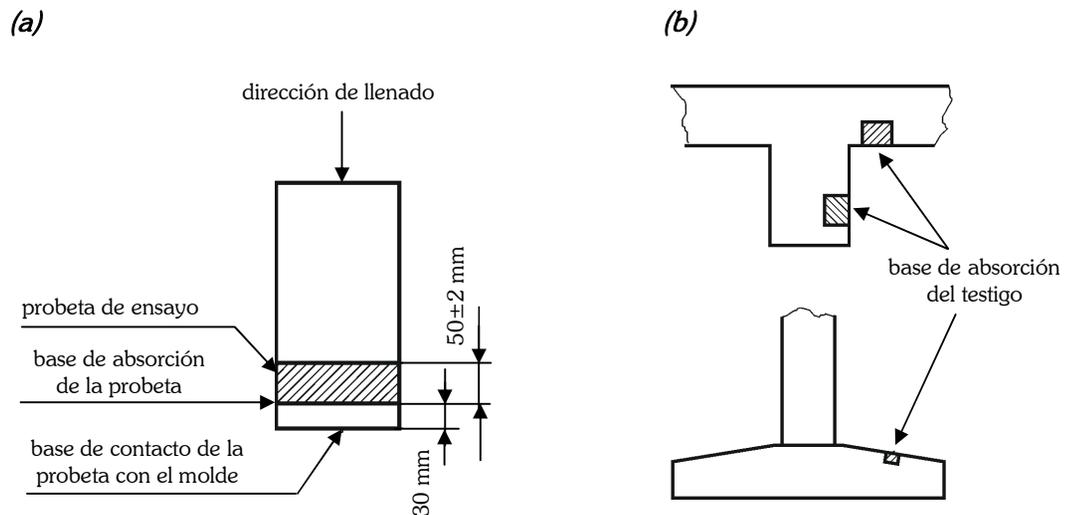


Figura 4.1: Muestras de ensayo: (a) probeta y (b) testigos, (norma IRAM 1871).

#### 4.2.3. Forma, tamaño y dimensiones de la muestra

Como la muestra a ensayar debe presentar el tamaño suficiente para ser representativa del hormigón estudiado, la recomendación RILEM establece la preferencia del empleo de muestras cilíndricas de 150 mm de diámetro por 50 mm de espesor, aunque contempla el empleo de muestras de sección rectangular con la condición de que el área mínima de ensayo sea de  $17500 \text{ mm}^2$ . A su vez señala que como mínimo deben ensayarse tres muestras.

La norma IRAM es más específica en este aspecto, ya que indica la utilización de muestras obtenidas mediante el aserrado de probetas o testigos de  $50 \pm 2$  mm de altura y 100 mm de diámetro nominal, cuando la totalidad del agregado grueso empleado pase por el tamiz IRAM 26,5 mm, o de 150 mm de

diámetro cuando la totalidad pase por el tamiz IRAM 37,5 mm. Al igual que la recomendación RILEM esta norma indica que como mínimo deben ensayarse 3 muestras.

La norma ASTM establece el ensayo de como mínimo dos muestras de  $100 \pm 6$  mm de diámetro por  $50 \pm 3$  mm de espesor, independientemente del tamaño máximo del agregado grueso.

Respecto a la medición del área de ensayo, la norma ASTM especifica su cálculo a partir del diámetro obtenido como promedio de al menos cuatro diámetros, medidos en la cara correspondiente a la base de absorción. Según la norma IRAM, el diámetro se obtendrá del promedio de dos diámetros perpendiculares medidos a la mitad de la altura de la muestra. La recomendación RILEM no aclara la forma de medición del área, pero establece al igual que las otras dos normas que la precisión en la medición de las dimensiones de la muestra deberá ser de 0,1 mm.

Ninguno de los documentos en análisis considera el hecho de que las muestras deban presentar una sección transversal constante y un completo paralelismo entre las caras extremas, sólo la norma ASTM hace una ligera mención al considerar que la variación entre las secciones transversales de las caras superior e inferior de la muestra deberá ser menor al 0,1%.

#### **4.2.4. Instrumental**

Tanto la norma IRAM como la ASTM detallan el instrumental necesario para llevar a cabo el ensayo, sin embargo la recomendación RILEM no hace referencia a este aspecto.

En relación al recipiente de ensayo, la norma ASTM especifica la utilización de un material resistente a la corrosión y de un tamaño lo suficientemente grande

como para poder colocar todas las muestras. Por otro lado, la norma IRAM establece que el recipiente deberá ser de base plana, de altura interior mayor de 80 mm y contar con una tapa hermética. Esto último es con el objetivo de alcanzar una humedad de equilibrio en el interior del recipiente mayor al 95% y reducir la evaporación de las caras expuestas, ya que las características de absorción difieren dependiendo de la humedad del entorno.

Con respecto a la base de apoyo de la muestra, ambas normas señalan el hecho de que debe permitir el libre acceso del agua a través de la cara de ensayo y estar constituida por un material resistente a la corrosión. La norma IRAM establece que la superficie mínima de contacto de la base de la muestra con el agua deberá ser por lo menos del 90% de la superficie de apoyo de la probeta o testigo. Además, destaca que la base de apoyo debe estar perfectamente nivelada, verificable por medio de un nivel de burbuja. Esto último constituye un aspecto muy importante a tener en cuenta, sobre todo cuando el recipiente de ensayo es suficientemente grande y contiene un importante número de muestras, debido a que todas deben estar sumergidas a la misma profundidad.

De acuerdo a la norma IRAM, la balanza a utilizar deberá tener una capacidad de 3000 g como mínimo con una precisión de 0,1 g. La norma ASTM no establece una capacidad mínima, pero manifiesta expresamente que dicha capacidad deberá ser suficiente, con una precisión de  $\pm 0,01$  g. Sería interesante además, que las normativas contemplaran una capacidad máxima de la balanza, dado que usualmente estos dispositivos trabajan de forma óptima aproximadamente en el valor medio de dicha capacidad.

La norma IRAM describe dentro del instrumental a utilizar para el secado de las muestras, el empleo de una estufa a  $50 \pm 2$  °C, debiéndose verificar que el perfil de variación de la temperatura en todo su volumen útil se mantenga en dicho nivel, para lo cual se hará uso de un registrador continuo con una incertidumbre de  $\pm 0,5$  °C. A su vez dicha norma no hace referencia alguna a la humedad relativa

ambiente en el interior de la estufa, cuestión considerada en la norma ASTM. Esta última establece el empleo de una cámara con circulación de aire capaz de mantener una temperatura de  $50 \pm 2$  °C y una humedad relativa de  $80 \pm 3\%$ .

Además, las normas ASTM e IRAM recomiendan emplear un disco diamantado para el aserrado de las muestras, un calibre con precisión de 0,1 mm, para medir las dimensiones de las muestras, un paño para limpiar el exceso de agua de la cara de ensayo, y dispositivos como relojes y cronómetros para determinar los tiempos de pesaje de las probetas o testigos.

La norma ASTM además indica el empleo de recipientes individuales herméticos para el almacenamiento de las muestras durante la fase de redistribución de humedad interna, luego del secado y previo a la realización del ensayo propiamente dicho. La norma IRAM por otro lado, indica el empleo de películas de polietileno para envolver las muestras y mantenerlas aisladas hasta la ejecución del ensayo. Además plantea el uso de bolsas de polietileno para aislar las muestras del medio externo durante su enfriamiento, previo al control de peso durante la etapa de secado.

La norma ASTM agrega además el empleo de un material para el sellado lateral de las muestras, el cual debe secarse dentro de los 10 minutos de aplicado. Por otro lado, adiciona la utilización de bolsas de polietileno, para colocar en la cara superior de las muestras a modo de capucha durante el transcurso del ensayo. La norma IRAM en la parte correspondiente al *Procedimiento* sólo menciona que las muestras deberán impermeabilizarse lateralmente, aunque no aclara características ni período máximo de secado del producto.

#### 4.2.5. Pre-acondicionamiento

Una vez aserradas las muestras de las probetas o testigos, el paso siguiente consiste en su pre-acondicionamiento. El mismo consta del secado con una subsiguiente fase de redistribución de la humedad interna, de modo tal que su contenido resulte uniforme en todo el espesor de la muestra.

La recomendación RILEM es la que describe en forma más detallada y criteriosa los pasos a seguir. Para ello, en un primer paso se determina la concentración de humedad evaporable al finalizar el curado  $w_e$ , para lo cual las muestras se secan a 105 °C hasta que la pérdida de peso entre dos pesadas consecutivas efectuadas cada 24 h resulte inferior a 0,5 g. La concentración  $w_e$  se determina como la diferencia entre la masa de la muestra al finalizar el curado y la masa luego del secado, referida a la masa seca.

El segundo paso consiste en la determinación de la concentración de la humedad de equilibrio intermedia  $w_{e,75}$ , la cual se alcanza mediante un experimento de desorción. Para ello, al finalizar el curado, al hormigón bajo estudio se lo somete a  $20 \pm 1$  °C de temperatura y  $75 \pm 2\%$  de humedad relativa, hasta alcanzar la humedad de equilibrio. Este clima puede ser generado instalando una cámara que controle humedad y temperatura, o bien mediante el empleo de una caja sellada, a dicha temperatura y con una disolución saturada de cloruro de sodio. En cualquiera de los casos debe existir suficiente circulación de aire. Luego, al material se lo somete a un secado a 105 °C, hasta que la variación entre pesadas consecutivas efectuadas cada 24 h difiera en menos de 0,1 g. La concentración  $w_{e,75}$  resulta de la diferencia entre la masa de la muestra en equilibrio con  $75 \pm 2\%$  de humedad relativa y la masa seca, referida a la masa seca del hormigón.

Finalmente se determina la pérdida de peso que debe sufrir la muestra durante el presecado como:

$$\Delta m = (w_e - w_{e,75}) / (1 + w_e) \cdot m_0$$

donde:

$w_e$ : concentración de humedad evaporable al finalizar el curado

$w_{e,75}$ : concentración de la humedad de equilibrio intermedia

$m_0$ : masa de la muestra luego del período de curado

Se inicia entonces el presecado, el cual consiste en colocar las muestras en una cámara ventilada a 50 °C hasta alcanzar el  $\Delta m$  calculado de pérdida de peso, con una precisión del 5%. Para prevenir la formación de gradientes radiales de humedad, previo al secado, las superficies laterales de las muestras son selladas con un material impermeable y estanco.

Le sigue una fase de redistribución de la humedad interna, que consiste en el almacenamiento de las muestras en pequeños recipientes a una temperatura de 50 °C durante un período de 27 días, con una duración mínima de 14 días. Luego, las muestras deben adquirir durante un mínimo de 24 h antes del comienzo del ensayo, la temperatura de equilibrio bajo condiciones de laboratorio ( $20 \pm 1$  °C), estando selladas con el fin de prevenir cambios de humedad durante el enfriamiento.

La norma IRAM también considera la etapa de secado previo a la realización del ensayo, pero bajo una metodología muy diferente. Se parte de las muestras en la condición saturado y superficie seca, para lo cual las mismas son colocadas en inmersión durante 72 h. Luego, se da comienzo al secado sometiéndose las muestras de ensayo a una temperatura de  $50 \pm 2$  °C, durante un período determinado por el tiempo que tardan dichas muestras en alcanzar la constancia de masa, la cual se adquiere cuando la diferencia entre determinaciones de la masa seca efectuadas cada 24 h resulta menor al 0,1%. Las probetas o testigos de la serie de ensayo deben pesarse a temperatura ambiente, por lo cual una vez retiradas de la estufa y previo al pesaje, deben permanecer en bolsas de

polietileno hasta la temperatura de equilibrio con el medio, de manera de evitar el intercambio de humedad con el ambiente.

Un aspecto a destacar es el hecho de que esta norma no hace mención alguna del control de la humedad durante el secado. Además, no considera el período de distribución de la humedad interna, sólo propone el secado seguido del sellado con doble pliego de una película de polietileno, de manera de aislar la muestra del entorno tan sólo durante 24 h. Respecto a esto último, como fuera comentado en el *Capítulo 2*, existen incertidumbres acerca de la posible redistribución espontánea de la humedad interna en materiales con bajos contenidos totales de agua.

Para la norma ASTM, el pre-acondicionamiento consiste en el estacionamiento de las muestras en una cámara a  $50 \pm 2$  °C de temperatura y  $80 \pm 3\%$  de humedad relativa ambiente, durante 3 días. Esta norma resalta la importancia del control de la humedad relativa al sugerir, en caso de no contar con un regulador de la humedad ambiente, el empleo de un desecador conteniendo una disolución saturada de bromuro de potasio. Un aspecto crítico en esta normativa es el hecho de efectuar el secado durante un período fijo de tiempo, el cual varía considerablemente dependiendo de la calidad del hormigón, de este modo podría sobrestimarse la calidad de hormigones pobres.

Otro aspecto a objetar en esta norma, a diferencia de la IRAM y la recomendación RILEM, es el hecho de que el secado se realiza previo al sellado lateral, lo cual puede dar lugar a la aparición de gradientes radiales de humedad interna.

Luego del secado, la norma ASTM al igual que la recomendación RILEM, plantea una fase de distribución homogénea de la humedad interna, colocando las muestras en recipientes individuales totalmente herméticos a  $23 \pm 2$  °C, por lo

menos durante 15 días previo al inicio del ensayo. Sin embargo esta cuestión es ignorada en la norma IRAM.

#### 4.2.6. Procedimiento

El procedimiento básico indicado en los diferentes documentos, consiste en registrar la masa de la muestra previo al contacto con el agua (masa seca), para luego ponerla en contacto con el líquido a través de una de sus caras y registrar el incremento de peso a intervalos de tiempo prefijados (masa húmeda).

Según la norma ASTM, la profundidad de inmersión de la cara de ensayo debe estar comprendida entre 1 y 3 mm, para la norma IRAM debe ser de  $3 \pm 1$  mm, mientras que la recomendación RILEM manifiesta que la profundidad de inmersión no deberá superar los 3 mm. En ninguno de los casos se plantea el empleo de niveles superiores a los 5 mm.

Por otro lado, la recomendación RILEM establece que tanto las muestras como el recipiente con agua, deben permanecer en equilibrio con la temperatura ambiente a  $20 \pm 1$  °C, lo mismo sostienen las normas IRAM y ASTM pero a una temperatura de  $20 \pm 2$  °C y  $23 \pm 2$  °C, respectivamente.

En cuanto a los intervalos de tiempo en los cuales deben efectuarse las determinaciones de la masa húmeda, la recomendación RILEM indica las mediciones a los 10 min, 1 h, 4 h y 24 h del instante inicial del contacto de la muestra con el líquido, aunque aclara que dependiendo del propósito del ensayo, el período de duración puede extenderse más allá de las 24 h, pero debe finalizar cuando el frente de agua alcance la cara superior de la muestra.

Para la norma IRAM los tiempos de medición corresponden a 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 24 h, 48 h y a continuación cada  $24 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ , hasta que la variación de la masa húmeda de la muestra resulte inferior al 0,1% entre dos

determinaciones sucesivas. En caso de observar humedad en la cara superior de la muestra antes de las 6 h, dicha norma establece que el ensayo debe realizarse nuevamente, determinando la masa húmeda para los tiempos: 30 min, 45 min, 1 h y a continuación cada 30 min hasta la aparición de humedad en la cara superior.

La norma ASTM establece los tiempos:  $60\text{ s} \pm 2\text{ s}$ ,  $5\text{ min} \pm 10\text{ s}$ ,  $10\text{ min} \pm 2\text{ min}$ ,  $20\text{ min} \pm 2\text{ min}$ ,  $30\text{ min} \pm 2\text{ min}$ ,  $60\text{ min} \pm 2\text{ min}$ , y luego cada una hora hasta completar las 6 h, con una tolerancia de  $\pm 5\text{ min}$ . Luego de las 6 h, las determinaciones de la masa húmeda continuarán cada 24 h durante 3 días, posteriormente se realizarán 3 mediciones más entre los días 4 a 7, separadas por lo menos 24 h, para finalmente efectuar la última medición al menos 24 h luego del séptimo día. En el caso de las determinaciones efectuadas posteriormente a las 6 h, la tolerancia será de  $\pm 2\text{ h}$ .

Respecto a las tolerancias impuestas por cada normativa, la norma IRAM no especifica tolerancia alguna para tiempos menores a las 48 h, recién a partir de dicho período de tiempo, establece que las mediciones pueden efectuarse con una hora en exceso o en defecto de la estipulada. Si bien parece bastante acertada la tolerancia adoptada, deberían estipularse tolerancias para los primeros instantes del ensayo como lo indica la norma ASTM. Esta última, establece con buen criterio tolerancias variables dependiendo del instante de medición, aunque algunas parecieran un tanto excesivas, como es el caso de  $10\text{ min} \pm 2\text{ min}$ . Por otro lado, esta norma, para períodos de tiempo prolongados, deja un tanto “libre” la decisión del operador del momento en que debe efectuar la determinación de la masa húmeda. Así, por ejemplo, señala que entre los días 4 y 7 deben efectuarse tres determinaciones separadas por lo menos 24 h. Por otro lado, la recomendación RILEM, no menciona tolerancia alguna en los tiempos de medición.

Otro aspecto a destacar de las normas, se refiere al tiempo máximo que debe emplear quien realiza el ensayo en efectuar el pesaje, es decir en retirar la muestra, quitar con un paño el exceso de agua, colocarla en la balanza, registrar su

peso y volverla a depositar en su posición original. La norma IRAM establece que dicho período de tiempo debe ser inferior a los 30 s, mientras que la ASTM señala 10 s, para los primeros instantes del ensayo hasta los 60 min, y 1 min para los instantes restantes.

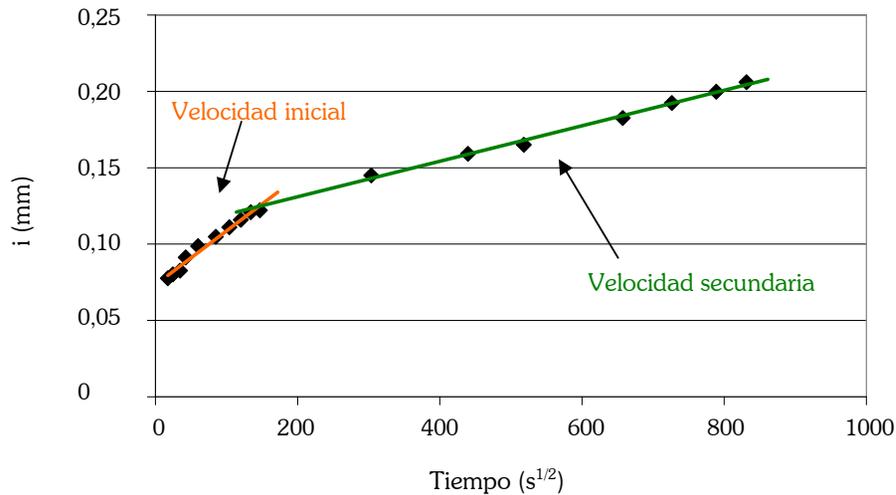
#### 4.2.7. Cálculo

En cuanto al cálculo, cada normativa establece una metodología particular definiendo parámetros propios que describen el fenómeno estudiado. Así, la norma ASTM propone el cálculo de dos parámetros: las *velocidades inicial* ( $S_i$ ) y *secundaria* ( $S_s$ ) de absorción de agua, expresadas ambas en  $\text{mm/s}^{1/2}$ . Para cuantificar dichos parámetros, es necesario graficar el incremento de masa por unidad de área de las muestras de ensayo en función de la raíz cuadrada del tiempo. La velocidad inicial se calcula como la pendiente de la recta que mejor ajusta los puntos experimentales obtenidos desde  $t = 1 \text{ min}$  hasta  $t = 6 \text{ h}$ , excluyéndose los puntos a partir de los cuales se observa un claro cambio de la pendiente. La velocidad secundaria se calcula de la misma forma pero considerando los puntos comprendidos entre  $t = 1 \text{ d}$  y  $t = 7 \text{ d}$ .

Dicha norma además, resalta el hecho de que las velocidades no podrán ser determinadas si los datos muestran una curva sistemática, es decir si las determinaciones no siguen una relación lineal, lo cual está indirectamente considerado al establecer 0,98 como valor mínimo del coeficiente de correlación. Para mayor claridad, el documento anexa un ejemplo del cálculo de las velocidades de succión (Fig. 4.2).

Como parámetros del ensayo, la norma IRAM calcula la *capacidad* ( $C$ ) y *velocidad de succión capilar* ( $S$ ) expresadas en  $\text{g/m}^2$  y  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ , respectivamente. La primera se define como el incremento de masa por unidad de área de la sección transversal de la probeta o testigo, correspondiente al tiempo en el que la variación

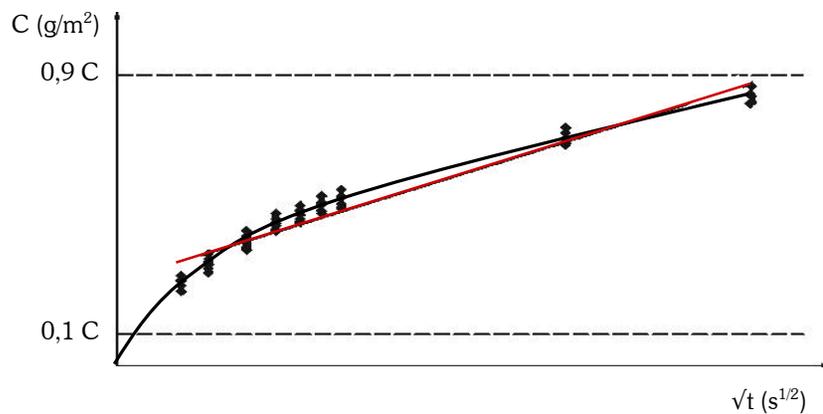
de masa resulta menor al 0,1% entre dos determinaciones sucesivas de la masa húmeda.



**Figura 4.2:** Esquema del cálculo de las velocidades de absorción inicial y secundaria de acuerdo a la norma ASTM C 1585.

La velocidad es calculada como la pendiente de la recta obtenida por ajuste de los puntos experimentales, obtenidos al graficar el incremento de masa por unidad de área en función de la raíz cuadrada del tiempo. Los datos experimentales considerados serán aquellos que cumplan las siguientes dos condiciones: los valores del incremento de masa por unidad de área de cada valor individual deben estar comprendidos entre el 10 y el 90% de la capacidad de succión capilar promedio de toda la serie de ensayo, y los valores individuales extremos deben estar comprendidos dentro del 15% del valor promedio. En el caso de testigos las evaluaciones se realizarán en forma individual. Esta norma exige la repetición del ensayo si el coeficiente de determinación del ajuste por cuadrados mínimos resulta menor a 0,80. Además, la norma presenta un ejemplo gráfico de la determinación de la velocidad de succión capilar, como puede apreciarse en la Fig. 4.3. En la misma se ha agregado la curva promedio de la absorción capilar en función del tiempo.

Según la norma IRAM 1871, la cantidad acumulada de agua absorbida por cada muestra en cada instante de ensayo, y la *Capacidad de succión capilar* ( $C$ ), se expresan en  $\text{g/m}^2$ , mientras que la *Velocidad de succión capilar* ( $S$ ) en  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ . Estos parámetros difieren dimensionalmente de las empleadas por la norma ASTM, la cual expresa la cantidad acumulada de agua absorbida ( $i$ ) en mm, debido a que esta magnitud es referida a la densidad del líquido de ensayo, que en el caso del agua corresponde a  $1\text{t/m}^3$ , de allí que el parámetro  $S$  dicha norma lo exprese en  $\text{mm/s}^{1/2}$ .



**Figura 4.3:** Esquema del cálculo de la velocidad de succión capilar según la norma IRAM 1871.

La norma ASTM diferencia claramente dos estadios en la curva de absorción en función del tiempo transcurrido, el primero, en el que la succión se produce muy rápidamente (velocidad inicial), y el segundo, en el que la tangente a la curva decae abruptamente (velocidad secundaria). Esta sectorización de la curva pareciera describir en forma bastante genuina el comportamiento estudiado. Por otro lado, la norma IRAM calcula una única velocidad que no es tangente a la curva sino más bien secante (Fig. 4.3), la cual tiende a una evaluación más global del comportamiento, aunque está influenciada por los puntos extremos que son proclives a aumentar o disminuir el parámetro evaluado.

Otro aspecto relevante lo constituye el hecho de que la norma ASTM establece el cálculo de las velocidades para períodos de inmersión prefijados, independientemente del hormigón estudiado. Esto puede inducir a alcanzar distintos niveles de humedad en la muestra, dependiendo de la calidad del hormigón estudiado. De este modo se estaría sobrevaluando la calidad de hormigones pobres al obtener parámetros de succión bajos, consecuencia de períodos de secado insuficientes. Esta última cuestión es considerada en la norma IRAM, al establecer para el cálculo de la velocidad un límite superior dado por un porcentaje de la capacidad de succión, cuyo valor está indirectamente determinado por la calidad del propio hormigón.

La norma ASTM analiza el fenómeno sólo desde el punto de vista de la velocidad con la que el agua asciende a través de la estructura de poros y capilares del hormigón, sin considerar que dos hormigones pueden presentar igual velocidad de ascenso pero diferente capacidad de retención de agua. Teniendo en cuenta esta cuestión, la norma IRAM propone el cálculo de la capacidad de succión capilar como otro parámetro de caracterización del fenómeno.

La recomendación RILEM no da una definición concreta de los parámetros de succión capilar obtenidos en el ensayo, sólo indica que deberán calcularse la masa de agua absorbida y la absorción de agua por unidad de área de ensayo, expresadas en g y en  $g/m^2$ , para distintos períodos de tiempo. Pero establece que la cantidad de agua absorbida por unidad de área, así como la velocidad de succión capilar, serán calculadas de acuerdo a los propósitos particulares del estudio.

Del análisis de las diferentes variables que se consideran en cada uno de los documentos evaluados, los cuales están resumidos en la Tabla 4.1, surge que debido a la aplicación de diferentes criterios para la evaluación de la succión capilar, es imprescindible indicar bajo que normativa o recomendación se llevará a cabo el ensayo a fin de realizar una adecuada interpretación de los resultados.

**Tabla 4.1:** Cuadro comparativo de los documentos analizados.

		<i>Documentos</i>			
		<i>IRAM</i>	<i>ASTM</i>	<i>RILEM</i>	
<b>Muestras</b>	<b>Cara de ensayo</b>	Probetas: sección ubicada a 30 mm de la base. Testigos: superficie externa en contacto con el medio.		Probetas: superficie adyacente al fondo del molde. Testigos: n/d	
	<b>Tamaño y forma</b>	d= 100 mm e=50±2 mm	100% pasa tamiz IRAM 26,5 mm	d=100±6 mm e=50±3 mm	Muestras cilíndricas: d=150 mm e=50 mm Muestras prismáticas: A <sub>min</sub> :17500 mm <sup>2</sup>
		d= 150 mm e=50±2 mm	100% pasa tamiz IRAM 37,5 mm		
<b>Nº mínimo</b>	3		2	3	
<b>Estufa</b>	T: 50±2°C. Registrador continuo con incertidumbre de ±0,5°C		T: 50±2°C, HR: 80±3%. Circulación de aire.	n/d	
<b>Impermeabilizante</b>	Impermeabilizante para el sellado de las caras laterales.			n/d	
<b>Pre-acondicionamiento</b>	Saturación de las muestras: inmersión en agua durante 72 h. Secado: colocación de las muestras en estufa (T: 50±2°C) hasta constancia de masa (diferencia <0,1%). Estacionamiento en ambiente de laboratorio: muestras envueltas en bolsas de polietileno.		Secado: estacionamiento de las muestras en cámara (T: 50±2°C, HR: 80±3%) durante 3 días. Redistribución de la humedad interna: colocación de las muestras en recipientes herméticos individuales a 23±2°C al menos durante 15 días previo al inicio del ensayo.	Determinación de la concentración de humedad evaporable al finalizar el curado (W <sub>e</sub> ). Determinación de la concentración de la humedad de equilibrio intermedia (W <sub>e,75</sub> ). Determinación de la pérdida de peso que debe sufrir la muestra durante el presecado (Δm). Presecado: colocación de las muestras en cámara ventilada a 50°C hasta alcanzar el valor Δm. Redistribución de la humedad interna: almacenamiento de las muestras en recipientes a 50°C durante 27 días. Temperatura de equilibrio: estacionamiento de las muestras (mínimo de 24 h) a 20±1°C previo al inicio del ensayo.	
<b>Nivel de inmersión de la cara de ensayo</b>	3±1 mm		2±1 mm	≤3 mm	

Tabla 4.1 (cont.): Cuadro comparativo de los documentos analizados.

		<i>Documentos</i>		
		<i>IRAM</i>	<i>ASTM</i>	<i>RILEM</i>
<b>Procedimiento</b>	<b>Intervalos de determinación de la masa húmeda</b>	30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 24 h, 48 h y cada 24±1 h hasta constancia de masa (diferencia<0,1%). Repetición del ensayo: cuando se observe humedad en la cara superior antes de las 6 h. En este caso los intervalos serán: 30 min, 45 min, 1 h y cada 30 min. Finalización: cuando se adquiere la constancia de masa o cuando aparece humedad en la cara superior.	60 s±2 s, 5 min±10 s, 10 min±2 min, 20 min±2 min, 30 min±2 min, 60 min±2 min y cada 1 h hasta completar las 6 h (tolerancia: ±5 min). Luego cada 24 h durante 3 días, posteriormente se realizan 3 mediciones entre los días 4 y 7, separadas por lo menos 24 h (tolerancia: ±2 h). Finalización: La última medición se debe realizar por lo menos 24 h luego del 7º día.	10 min, 1 h, 4 h y 24 h. El período de medición puede extenderse dependiendo de los propósitos del ensayo. Finalización: cuando el frente de agua alcance la cara superior de la muestra. Tolerancia: n/d.
	<b>Parámetros obtenidos</b>	<i>Capacidad de succión capilar [g/m<sup>2</sup>] (C)</i> : promedio de las capacidades individuales, obtenidas como el incremento de masa por unidad de área de la sección transversal, correspondiente al tiempo en que la variación de masa resulta menor al 0,1% entre dos determinaciones sucesivas de la masa húmeda. <i>Velocidad de succión capilar [g/(m<sup>2</sup>.s<sup>1/2</sup>)] (S)</i> : pendiente de la recta obtenida con los puntos experimentales que cumplen con las siguientes condiciones: -el incremento de masa por unidad de área de cada valor individual se encuentran comprendidos entre el 10 y el 90% de C. -los valores individuales se hallan dentro del 15% del valor promedio. En el caso de testigos las determinaciones de los parámetros se realizan individualmente. R <sup>2</sup> >0,80	<i>Velocidad inicial de absorción de agua [mm/s<sup>1/2</sup>] (S<sub>i</sub>)</i> : pendiente de la recta que mejor ajusta los puntos experimentales obtenidos desde t=1 min hasta t=6 h. <i>Velocidad secundaria de absorción de agua [mm/s<sup>1/2</sup>] (S<sub>s</sub>)</i> : pendiente de la recta que mejor ajusta los puntos experimentales obtenidos desde t=1 d hasta t=7 d. r>0,98	n/d. La cantidad de agua absorbida por unidad de área y la velocidad de succión capilar se determinarán dependiendo de los propósitos particulares del estudio.

d: diámetro

e: espesor

A: área

n/d: no detalla

r: coeficiente de correlación lineal

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación

# Capítulo 5

---

*Desarrollo Experimental*

## 5.1. Programa Experimental

En el presente capítulo se analizan los factores mencionados en el *Capítulo 1*, considerados como más relevantes en cuanto a la afectación que pueden provocar sobre las determinaciones experimentales del ensayo de absorción de agua por capilaridad.

### 5.1.1. Materiales y mezclas evaluadas

En los estudios realizados se emplearon cementos portland del tipo compuesto (CPC 40), normal (CPN 40) y de alto horno de alta resistencia a los sulfatos (CAH 40, ARS), cuyas características físico-químicas se presentan en la Tabla 5.1. En todos los casos los cementos cumplieron los requerimientos establecidos en las normas IRAM 50000 y 50001. El tipo y contenido de adiciones presentes en cada tipo de cemento no pudo conocerse ciertamente por tratarse de cementos comerciales. Sólo fueron informados por el fabricante contenidos del 18% de filler y 12% de escoria en el caso del cemento CPC.

**Tabla 5.1:** Análisis físico-químico de los cementos utilizados.

<i>Propiedades físico-químicas</i>	<i>Cementos</i>		
	<i>CPC</i>	<i>CPN</i>	<i>CAH</i>
Superficie específica (Blaine) (cm <sup>2</sup> /g)	4380	4880	5180
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	3,03	3,16	2,98
Pérdida por calcinación (%)	8,20	3,23	2,98
Residuo insoluble (%)	2,70	2,90	5,50
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ) (%)	2,09	2,49	2,34
Óxido de magnesio (MgO) (%)	0,95	1,09	4,67
Sílice soluble (SiO <sub>2</sub> ) (%)	17,10	19,10	20,05
Óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	4,17	4,39	2,74
Óxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	3,76	3,70	9,26
Óxido de calcio (CaO) (%)	60,95	63,42	52,07
Cloruros (Cl) (%)	0,011	<0,005	0,021

Respecto al agregado grueso, en la mayoría de los casos se empleó piedra partida granítica (PPG) de tamaños máximos 19 y 25 mm, mientras que en los hormigones H-1, H-2, H-17 y H-18 se utilizó piedra partida cuarcítica (PPC), en los hormigones H-15 y H-16 piedra partida basáltica (PPB), y en los hormigones identificados como H-19 y H-20 canto rodado silíceo (CRS). Por otro lado, en el caso de los hormigones H-21 y H-22 se emplearon agregados gruesos reciclados (AGR), obtenidos de la trituración de hormigones de desecho de características tecnológicas desconocidas, conteniendo piedra partida granítica como agregado grueso natural. Como agregado fino se utilizó arena silíceo de río. En la Tabla 5.2 se presentan los valores de densidad en estado saturado y superficie seca ( $D_{ss}$ ) y absorción de agua en 24 h de los distintos agregados gruesos empleados.

**Tabla 5.2:** Absorción en 24 h y densidad saturada y superficie seca de los agregados.

<i>Agregado grueso</i>	<i>Propiedades físicas</i>	
	<i>Absorción (%)</i>	<i>D<sub>ss</sub></i>
PPG	0,3	2,72
PPB	0,8	3,00
PPC	2,0	2,48
CRS	0,5	2,58
AGR	4,6	2,45

Para la elaboración de los hormigones y de acuerdo al plan experimental propuesto, se plantearon diferentes mezclas produciendo modificaciones en los materiales componentes, en las proporciones de los materiales y en la metodología de curado aplicada. Ello con el fin de evaluar la afectación de distintos factores tecnológicos frente al transporte de agua por capilaridad, entre los que se destacan la razón a/c, el tratamiento de curado, el empleo de agregados de distinto tamaño y tipo, y la utilización de diferentes tipos de cementos. Los distintos hormigones fueron elaborados en varias etapas a través del tiempo, motivo por el cual alguno de los materiales empleados podría presentar características diferenciadas. En la Tabla 5.3 se presentan las proporciones de las mezclas.

Tabla 5.3: Proporciones de las mezclas en estudio.

Hormigón	Razón a/c	Proporciones de las mezclas (kg/m <sup>3</sup> )							
		Agua	Cemento		Fino	Agregados			Grueso reciclado (AGR)
			C.U.C.	Tipo		Grueso natural		Tipo	
					6-20 mm	10-30 mm			
H-1	0,40	180	450	CPC	745	180	750	PPC	-
H-2	0,60	180	299	CPC	870	180	750	PPC	-
H-3	0,40	155	388	CPC	831	208	832	PPG	-
H-4	0,50	155	310	CPC	897	208	832	PPG	-
H-5	0,60	155	258	CPC	939	208	832	PPG	-
H-6	0,45	165	370	CPC	867	1009	-	PPG	-
H-7	0,65	165	253	CPC	957	1009	-	PPG	-
H-8	0,40	168	425	CPC	790	1000	-	PPG	-
H-9	0,60	168	280	CPC	920	1000	-	PPG	-
H-10	0,50	170	340	CPC	840	1000	-	PPG	-
H-11	0,50	175	350	CPN	824	1000	-	PPG	-
H-12	0,50	175	350	CAH	824	1000	-	PPG	-
H-13	0,45	165	370	CPC	854	980	-	PPG	-
H-14	0,65	162	254	CPC	852	980	-	PPG	-
H-15	0,45	165	370	CPC	854	1000	-	PPB	-
H-16	0,65	165	254	CPC	952	1000	-	PPB	-
H-17	0,45	176	400	CPC	818	900	-	PPC	-
H-18	0,65	180	276	CPC	947	900	-	PPC	-
H-19	0,45	154	357	CPC	868	980	-	CRS	-
H-20	0,65	156	246	CPC	961	980	-	CRS	-
H-21	0,40	148	388	CPC	823	50	208	PPG	713
H-22	0,50	155	310	CPC	897	50	208	PPG	711
H-23	0,40	165	412	CPC	820	200	800	PPG	-
H-24	0,50	165	330	CPC	890	200	800	PPG	-
H-25	0,60	165	275	CPC	938	200	800	PPG	-
H-26	0,40	168	425	CPC	800	-	1000	PPG	-
H-27	0,60	168	280	CPC	920	-	1000	PPG	-
H-28	0,50	190	381	CPC	806	975	-	PPG	-
H-29*	0,45	170	381	CPC	693	1067	-	PPG	-
H-30	0,45	166	370	CPC	854	979	-	PPG	-
H-31	0,65	170	256	CPC	950	979	-	PPG	-

\*: se utilizó un aditivo incorporador de aire en una dosis de 0,05% en peso del cemento.

### 5.1.2. Mezclado, compactación y curado

Todos los hormigones fueron elaborados en una hormigonera de tipo basculante convencional de 150 l de capacidad, con el fin de eliminar posibles variaciones en la energía entregada. Se moldearon probetas de diferentes

dimensiones que fueron compactadas únicamente mediante la utilización de una mesa vibradora, de manera tal de producir una compactación de similar magnitud en todas las mezclas.

En cuanto al curado se establecieron tres tratamientos diferentes, con el fin de crear ambientes particulares con temperatura y humedad relativa diferenciadas, según se indica a continuación:

1) Curado húmedo normalizado (*c.h.*): llevado a cabo de acuerdo a los lineamientos dispuestos por la norma IRAM 1534 o su análoga norma ASTM C 192-02: curado en cámara húmeda durante 28 días (T:  $23 \pm 2$  °C, HR: 95%).

2) Estacionamiento en ambiente de laboratorio (*lab.*): muestras estacionadas durante 28 días en ambiente de laboratorio (T:  $20 \pm 2$  °C, HR: 50%).

3) Estacionamiento al exterior (*ext.*): muestras colocadas durante 28 días en ambiente exterior de la ciudad de La Plata (Provincia de Buenos Aires, Argentina), en un sector al resguardo de los vientos con temperatura, humedad y precipitación medias durante el período de curado de 11 °C, 80% y 63 mm, respectivamente.

4) Curado húmedo prolongado (*c.h.p.*): tratamiento de curado efectuado en cámara húmeda durante 210 días.

En la Tabla 5.4 se presentan los tratamientos de curado aplicados en cada caso.

**Tabla 5.4:** Tratamiento de curado de los hormigones evaluados.

<i>Hormigón</i>	<i>Tipo de curado</i>			
	<i>Curado húmedo normalizado (c.h.)</i>	<i>Estacionamiento en laboratorio (lab.)</i>	<i>Estacionamiento al exterior (ext.)</i>	<i>Curado húmedo prolongado (c.h.p.)</i>
H-1	✓	✓		
H-2	✓	✓		
H-3	✓			
H-4	✓			
H-5	✓			
H-6	✓			
H-7	✓			
H-8	✓	✓	✓	
H-9	✓	✓	✓	
H-10	✓	✓		
H-11	✓	✓		
H-12	✓	✓		
H-13	✓			
H-14	✓			
H-15	✓			
H-16	✓			
H-17	✓			
H-18	✓			
H-19	✓			
H-20	✓			
H-21	✓			
H-22	✓			
H-23	✓			✓
H-24	✓			✓
H-25	✓			✓
H-26	✓		✓	
H-27	✓		✓	
H-28	✓			
H-29	✓			
H-30		✓		
H-31		✓		

### 5.1.3. Propiedades de los hormigones

#### 5.1.3.1. Estado fresco

En estado fresco las mezclas fueron evaluadas mediante la determinación del asentamiento, a través del ensayo de cono de Abrams (norma IRAM 1536), del

peso de la unidad de volumen (P.U.V.) (norma IRAM 1562) y del contenido de aire naturalmente incorporado (norma IRAM 1602). Los resultados obtenidos en los diferentes hormigones se presentan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Propiedades en estado fresco de las mezclas en estudio.

<i>Hormigón</i>	<i>Propiedades en estado fresco</i>		
	<i>Asentamiento (mm)</i>	<i>Aire (%)</i>	<i>P.U.V. (kg/m<sup>3</sup>)</i>
H-1	80	2,5	2342
H-2	65	2,5	2304
H-3	80	2,2	2408
H-4	80	1,8	2437
H-5	90	-	2380
H-6	25	2,4	2417
H-7	35	3,0	2379
H-8	85	2,3	2444
H-9	55	3,0	2394
H-10	30	1,9	2423
H-11	75	1,8	2444
H-12	45	2,0	2437
H-13	70	2,6	2404
H-14	30	2,7	2408
H-15	60	2,2	2494
H-16	60	2,6	2494
H-17	55	1,8	2323
H-18	55	1,8	2281
H-19	75	1,7	2337
H-20	50	3,0	2323
H-21	70	2,5	2352
H-22	55	2,4	2323
H-23	70	2,1	2423
H-24	65	2,3	2408
H-25	60	2,3	2380
H-26	90	2,6	2430
H-27	55	3,3	2352
H-28	85	2,1	2352
H-29	90	5,5	2309
H-30	75	2,4	2437
H-31	40	3,3	2394

### 5.1.3.2. Estado endurecido

Con el propósito de tener una mejor caracterización de cada uno de los hormigones en estado endurecido, se procedió a determinar de acuerdo a la norma ASTM C 642-97, la densidad en condición saturada a superficie seca ( $D_{ss}$ ) y seca ( $D_s$ ), la absorción de agua a 24 h y la porosidad como porcentaje del volumen de vacíos respecto del volumen total. Adicionalmente se cuantificó el nivel resistente de cada hormigón estudiado.

#### 5.1.3.2.1. Absorción, densidad y porosidad

La absorción, densidad y porosidad, si bien no constituyen indicadores estrictos del comportamiento durable del hormigón, representan propiedades estrechamente vinculadas a la estructura porosa de la matriz.

En la Tabla 5.6 se presentan los resultados de cada parámetro evaluado, obtenidos como promedio de 5 determinaciones. En ciertos casos, se observa que el tipo de curado no ejerce una influencia significativa sobre los resultados, especialmente en hormigones de elevada razón a/c. Es de destacar que en este caso, el efecto de la disminución neta de la porosidad capilar debido a la hidratación de la pasta, resulta menor al obtenido en hormigones de menor razón a/c. Sumado a ello, los hormigones fueron elaborados con cemento CPC, donde la presencia de filler pudo afectar la sensibilidad al curado.

Particularmente las magnitudes obtenidas en muestras estacionadas al exterior, presentaron valores próximos a los obtenidos en muestras curadas en cámara húmeda, debido a la elevada humedad relativa del ambiente durante el período de exposición.

Tabla 5.6: Absorción, densidad y porosidad de los hormigones en estudio.

Hormigón	Curado	Propiedades en estado endurecido			
		Absorción (%)	Densidad $D_s$ ( $kg/m^3$ )	Densidad $D_{ss}$ ( $kg/m^3$ )	Porosidad (%)
H-1	c.h.	5,6	2219	2348	13,0
	lab.	6,0	2208	2342	13,4
H-2	c.h.	6,4	2323	2184	13,9
	lab.	6,6	2318	2175	14,4
H-3	c.h.	-	-	-	-
H-4	c.h.	-	-	-	-
H-5	c.h.	-	-	-	-
H-6	c.h.	4,2	2319	2416	9,7
H-7	c.h.	5,2	2269	2388	11,8
H-8	c.h.	3,9	2342	2433	9,1
	lab.	4,3	2335	2435	10,0
	ext.	4,0	2350	2446	9,5
H-9	c.h.	4,9	2287	2398	11,1
	lab.	5,0	2280	2393	11,3
	ext.	4,9	2286	2398	11,1
H-10	c.h.	4,1	2317	2412	9,5
	lab.	4,2	2322	2419	9,6
H-11	c.h.	3,7	2345	2431	8,6
	lab.	3,9	2333	2425	9,2
H-12	c.h.	3,3	2341	2418	7,7
	lab.	3,7	2331	2418	8,7
H-13	c.h.	4,2	2350	2450	10,0
H-14	c.h.	4,6	2320	2430	10,8
H-15	c.h.	4,5	2420	2530	10,9
H-16	c.h.	4,9	2400	2510	11,8
H-17	c.h.	5,3	2220	2340	11,7
H-18	c.h.	6,4	2160	2300	13,8
H-19	c.h.	4,6	2299	2405	10,6
H-20	c.h.	4,8	2257	2365	10,8
H-21	c.h.	5,8	2110	2232	12,2
H-22	c.h.	6,1	2081	2207	12,7
H-23	c.h.	5,1	2316	2434	11,8
	c.h.p.	4,9	2312	2424	11,3
H-24	c.h.	5,3	2293	2411	12,0
	c.h.p.	4,9	2292	2404	11,2
H-25	c.h.	5,3	2292	2411	12,1
	c.h.p.	5,1	2280	2396	11,6
H-26	c.h.	4,1	2336	2430	9,5
	ext.	4,3	2332	2433	10,1
H-27	c.h.	4,8	2277	2386	10,8
	ext.	4,8	2283	2392	10,9
H-28	c.h.	5,4	2296	2419	12,3
H-29	c.h.	5,0	2277	2392	11,5
H-30	lab.	-	-	-	-
H-31	lab.	-	-	-	-

#### **5.1.3.2.2. Resistencia a compresión**

Es sabido que la resistencia a compresión constituye un parámetro de caracterización del hormigón desde el punto de vista mecánico, y aunque el valor de la misma no refleja el desempeño durable del material, es considerada como una de las propiedades más importantes para establecer una caracterización general de una determinada estructura.

En base a lo anterior y con el propósito de tener otro parámetro de referencia complementario al transporte de agua por capilaridad, se ejecutaron ensayos de resistencia a compresión simple a la edad de 28 días, sobre probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura, siguiendo los lineamientos indicados en la norma IRAM 1546. En la Tabla 5.7 se presentan los resultados obtenidos, donde cada valor informado corresponde al promedio de tres ensayos. En el caso de los hormigones sometidos a un curado húmedo prolongado de 210 días (c.h.p.), los valores informados corresponden a la determinación de la resistencia a dicha edad.

Las probetas fueron ensayadas con la condición de humedad que poseían de acuerdo al tratamiento de curado aplicado. Por tal motivo, las pequeñas diferencias halladas entre los valores resistentes de hormigones de similares características tecnológicas sometidos a diferente tratamiento de curado, deben ser atribuidas al contenido de humedad de las muestras al momento del ensayo.

**Tabla 5.7:** Resistencia a compresión promedio de los hormigones en estudio.

<i>Hormigón</i>	<i>Curado</i>	<i>Resistencia a compresión</i>
		<i>(MPa)</i>
H-1	c.h.	45,4
	lab.	44,0
H-2	c.h.	30,6
	lab.	25,1
H-3	c.h.	34,5
H-4	c.h.	29,1
H-5	c.h.	17,8
H-6	c.h.	40,0
H-7	c.h.	24,0
H-8	c.h.	38,7
	lab.	36,4
	ext.	35,2
H-9	c.h.	25,6
	lab.	22,2
	ext.	22,9
H-10	c.h.	34,0
	lab.	35,7
H-11	c.h.	37,1
	lab.	39,1
H-12	c.h.	34,0
	lab.	37,2
H-13	c.h.	34,7
H-14	c.h.	23,0
H-15	c.h.	35,0
H-16	c.h.	24,1
H-17	c.h.	39,9
H-18	c.h.	26,0
H-19	c.h.	34,3
H-20	c.h.	24,4
H-21	c.h.	28,7
H-22	c.h.	22,4
H-23	c.h.	37,6
	c.h.p.	47,1
H-24	c.h.	28,0
	c.h.p.	36,2
H-25	c.h.	23,6
	c.h.p.	29,9
H-26	c.h.	38,7
	ext.	39,9
H-27	c.h.	23,7
	ext.	22,6
H-28	c.h.	39,4
H-29	c.h.	36,0
H-30	lab.	40,2
H-31	lab.	24,2

## 5.2. Metodología utilizada en el ensayo de succión capilar

En los estudios realizados se empleó el método gravimétrico directo como técnica de evaluación de la succión capilar. Dicha técnica consiste en evaluar a intervalos de tiempo prefijados, el incremento de masa que experimentan muestras en contacto con agua, como consecuencia del ascenso del líquido por capilaridad.

Los procedimientos llevados a cabo en la presente Tesis, se ajustan a lo dispuesto en la norma IRAM 1871. En ciertas circunstancias en las que se realice alguna variante en los materiales utilizados, técnicas de ensayo o metodologías de cálculo, se hará expresa mención al respecto.

### 5.2.1. Muestras

En cuanto al tamaño y dimensiones de las muestras, las mismas dependen del tamaño máximo de agregado grueso utilizado, como se detalló en el punto 4.2.3.

La porción de la probeta que constituye la muestra de ensayo, se obtuvo de un primer aserrado efectuado a 30 mm de la cara adyacente al fondo del molde, la cual constituye la cara de ensayo, y de un segundo aserrado realizado a una distancia de  $50 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$  de aquél. (Fig. 5.1a).

Las muestras se obtuvieron del corte de probetas de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, mediante la utilización de un disco diamantado (Fig. 5.1b). En esta operación se procuró la obtención de muestras con sus caras planas y paralelas, de manera de tener una sección transversal constante en todo su espesor.

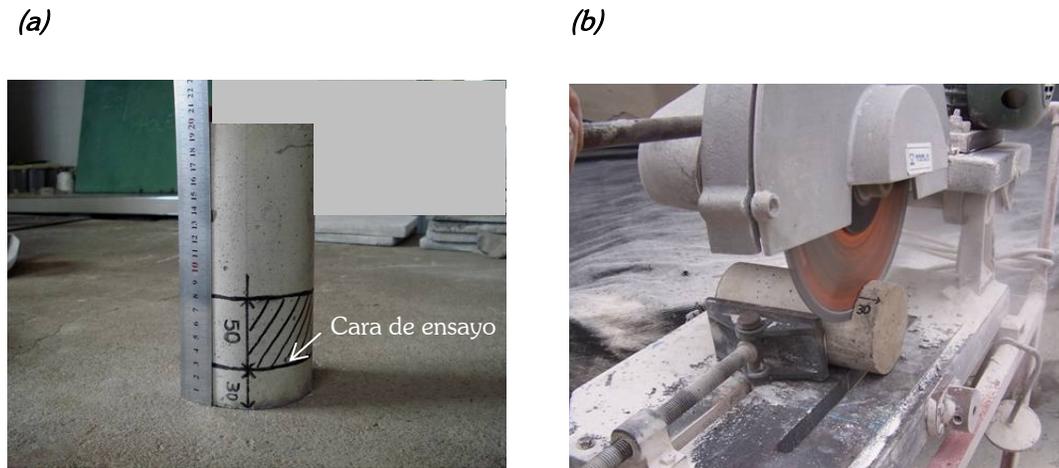


Figura 5.1: Extracción de la muestra: (a) ubicación en la probeta y (b) aserrado.

### 5.2.2. Pre-acondicionamiento

Previo a la ejecución del ensayo propiamente dicho, se llevó a cabo una etapa esencial consistente en el *pre-acondicionamiento* de las muestras. En esta instancia las muestras se recubrieron lateralmente con una película impermeabilizante, luego se saturaron, y finalmente se sometieron a un proceso de secado hasta lograr la constancia de masa.

Antes de realizar la impermeabilización, se calculó el área de la sección transversal de las muestras de cada una de las probetas o testigos de la serie de ensayo ( $A_c$ ). Para ello se determinó el diámetro de la sección transversal, promediando dos diámetros perpendiculares entre sí, medidos en la mitad de la altura de cada muestra (Fig. 5.2), empleando un calibre con precisión a la décima de milímetro.

Mediante la impermeabilización además de delimitar el área de ensayo, la cual corresponde a la cara de la muestra en contacto con la lámina de agua, se procura evitar la evaporación del líquido absorbido por los laterales, cuestión no contemplada en los cálculos. De esta forma se asegura un flujo unidireccional y

perpendicular a la cara de ensayo, evitando posibles líneas de flujo radiales que escapan a las consideraciones teóricas realizadas precedentemente, y que por lo tanto no se ajustan a los modelos y expresiones asumidas para la descripción del fenómeno.



**Figura 5.2:** Medición del diámetro de las muestras de ensayo.

El sellado puede efectuarse con cualquier producto de probada eficacia que garantice la total impermeabilización de los laterales de la muestra. En la presente Tesis, todas las experiencias se realizaron sellando las muestras con pintura a base de caucho clorado, típica pintura empleada en la impermeabilización de piscinas (Fig. 5.3a).

Posteriormente a la impermeabilización lateral de las muestras, se procedió al secado de las mismas hasta constancia de masa. Para ello, la norma IRAM 1871 establece la previa saturación de las muestras mediante inmersión en agua durante 72 h (Fig. 5.3b), con el fin de constituirse el estado de saturación a superficie seca, en el estado inicial para el comienzo del secado.

El secado constituye una etapa muy importante de la cual dependen los resultados obtenidos y mediante la que se procura obtener una distribución uniforme de humedad en todo el espesor de la muestra. Consiste básicamente en

la colocación de las muestras en una estufa (Fig. 5.3c), manteniendo la temperatura en todo su interior a  $50 \pm 2$  °C, y en el registro cada 24 h de la pérdida de masa producida en aquellas. Se asume adquirida la constancia de masa cuando la diferencia entre dos pesadas sucesivas resulta inferior al 0,1%.



**Figura 5.3:** Pre-acondicionamiento de las muestras *(a)* impermeabilización, *(b)* saturación, *(c)* secado y *(d)* embalaje.

Luego del secado, las muestras fueron envueltas con un film auto-adherente y colocadas en bolsas de polietileno, a fin de evitar el intercambio de humedad con

el medio externo (Fig. 5.3d). Posteriormente fueron estacionadas en un sector adecuado, de manera tal de evitar el posible daño de la envoltura de protección.

### 5.2.3. Ensayo

Cumplimentada la etapa del pre-acondicionamiento, se procedió a la ejecución del ensayo propiamente dicho. Para ello, los recipientes contenedores de las muestras se apoyaron sobre una superficie nivelada, colocándose en su interior los apoyos puntuales e introduciéndose luego el líquido de ensayo (agua) de manera de adquirir un nivel de 2 mm por encima del borde superior de los apoyos. Todo este sistema junto con las muestras embaladas, se mantuvo durante por lo menos 24 h en un ambiente a  $20 \pm 1$  °C, de modo que dichas muestras y el líquido de ensayo adquirieran la temperatura de laboratorio. Complementariamente y con el mismo objetivo, se colocó un depósito con líquido adicional en el ambiente donde se realizó el ensayo.

Como recipiente contenedor se empleó una batea de polipropileno de 600 x 400 x 170 mm de medidas externas, con una capacidad para alojar 10 muestras de 100 mm de diámetro, provisto de una tapa para mantener en el interior una humedad superior al 95%. A modo de apoyos puntuales se utilizaron varillas de aluminio pintado de sección transversal en forma de v.

Una vez preparado todo el equipamiento, se desembalaron las muestras quitando las bolsas de polietileno y la envoltura del film adherente. Se pesaron inmediatamente obteniéndose de esta forma la "masa seca" ( $M_{s_i}$ ) de cada muestra de ensayo  $i$ , para finalmente colocarlas en contacto con el líquido. Las muestras fueron introducidas primeramente en forma inclinada, para luego progresivamente poner en contacto toda la cara expuesta sobre los apoyos, evitando así la formación de burbujas sobre la superficie de ensayo. Durante todo el transcurso del ensayo se controló el nivel del agua manteniendo una altura constante de  $3 \pm 1$  mm por sobre el filo superior del apoyo.

Colocadas las muestras en contacto con el líquido de ensayo (Fig. 5.4), se registró el incremento de masa experimentado por las mismas, debido al ascenso capilar del agua.



**Figura 5.4:** Disposición de las muestras durante el ensayo.

Previo al pesaje, se eliminó el exceso del líquido de la superficie de ensayo mediante el empleo de un papel o trapo absorbente (Fig. 5.5a). De esta manera, a cada instante  $t$  evaluado, se obtuvo la "masa húmeda" ( $Mh_{it}$ ) de la muestra  $i$  (Fig. 5.5b). El seguimiento del incremento de masa fue realizado de acuerdo a la norma IRAM 1871 a los 30 min, a 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 24 h, 48 h y a continuación cada  $24 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ , hasta que la variación de masa de la probeta o testigo resultó menor que 0,1% entre dos determinaciones sucesivas de la masa húmeda.

Para el pesaje de las muestras se utilizó una balanza con capacidades mínima y máxima de 0,5 y 3100 g, con precisión, sensibilidad y reproducibilidad de 0,01, 0,01 y  $\pm 0,01$  g, respectivamente.

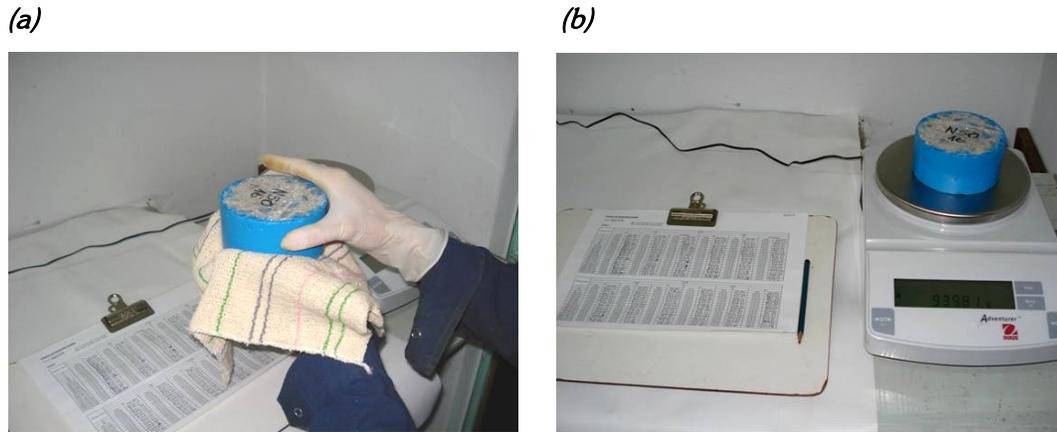


Figura 5.5: Metodología de ensayo: (a) secado superficial y (b) pesaje.

#### 5.2.4. Metodología de cálculo – Determinación de los parámetros de ensayo

Los parámetros que caracterizan el fenómeno estudiado se calculan teniendo en cuenta la expresión dada por la Ec. (3.11), en la cual la absorción acumulada, expresada en el ámbito internacional como  $i$ , se incrementa proporcionalmente con  $t^{1/2}$ . Así, la *Capacidad de succión capilar* de cada probeta o testigo  $i$  ( $C_{it}$ ), se calcula como el cociente del incremento de masa experimentado por la muestra en el instante  $t$  en el que la variación de la masa húmeda resulta menor que 0,1%, y el área de ensayo (Ec. 5.1):

$$\text{Ec. (5.1)} \quad C_{it} \left( \text{g} / \text{m}^2 \right) = \frac{Mh_{it} - Ms_i}{A_i}$$

donde:

$Mh_{it}$ : masa húmeda de la probeta o testigo  $i$  en el instante de lectura  $t$ , (g)

$Ms_i$ : masa seca de la probeta o del testigo  $i$ , (g)

$A_i$ : área de la sección transversal de la probeta o del testigo  $i$ , ( $\text{m}^2$ )

La norma IRAM 1871 propone el cálculo de dos parámetros de caracterización del hormigón en estudio: la *Capacidad de succión capilar* ( $C$ ) y la *Velocidad de succión capilar* ( $S$ ). La primera corresponde al promedio de las capacidades individuales de las muestras  $C_{ip}$  y representa la cantidad de agua que es capaz de absorber por capilaridad el hormigón, a través de su estructura porosa. La *Velocidad de succión capilar* ( $S$ ), expresado en  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ , se calcula como la pendiente de la recta obtenida al graficar el incremento de masa por unidad de área de todas las muestras que comprenden la serie de ensayo ( $C_{ip}$ ), en función de la raíz cuadrada del tiempo transcurrido ( $t^{1/2}$ ) (Fig. 4.3). Esta magnitud representa la rapidez a la cual el líquido ingresa por capilaridad a través del sistema de poros del hormigón. Los puntos considerados para calcular la pendiente fueron, a excepción del origen, los que cumplieron con las condiciones mencionadas en el *Capítulo 4*. Para la determinación de ambos parámetros se emplearon 5 muestras de ensayo por cada variable analizada.

### 5.3. Resultados y análisis

Se presentan aquí los resultados de los parámetros de succión capilar (velocidad y capacidad) obtenidos en el análisis de los diferentes factores estudiados. En ciertas circunstancias, se introdujeron como variables complementarias al factor analizado la razón a/c y el tratamiento de curado, a fin de contar con un espectro aún más amplio del comportamiento estudiado.

En algunos casos, los valores obtenidos corresponden a ensayos ejecutados previamente a la redacción de la actual norma IRAM 1871, en cuyo caso se hará expresa mención de las condiciones técnico-metodológicas bajo las cuales se llevó a cabo. Cuando no se realice aclaración alguna, se asumirá aplicada la mencionada norma en todas sus condiciones.

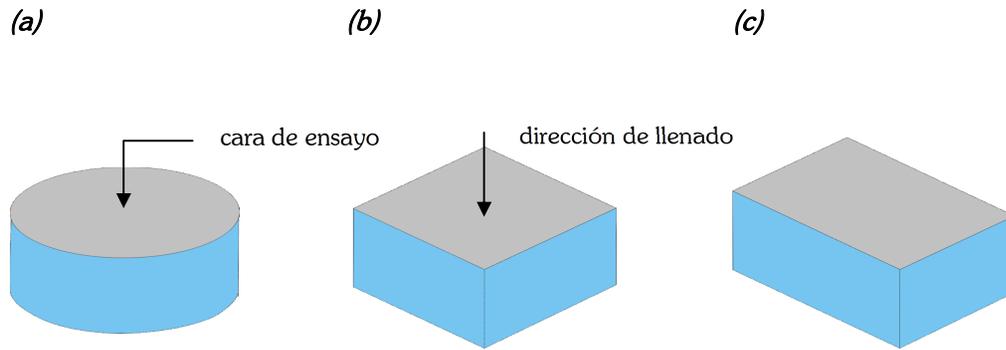
### 5.3.1. Factores relativos a las características de la muestra

#### 5.3.1.1. Forma de la muestra

Si bien la norma IRAM 1871 establece el empleo de muestras cilíndricas, resulta interesante analizar el comportamiento que pueden presentar otras formas geométricas frente al ensayo de succión capilar. Lo anterior cobra importancia cuando se desean establecer comparaciones entre muestras de diferente forma, fundamentalmente si éstas fueron ensayadas siguiendo normas internacionales que contemplan el empleo de diferente geometría, o bien, cuando ante la ausencia de formas cilíndricas, se requiere analizar el comportamiento de un determinado hormigón frente a la succión capilar empleando las muestras disponibles.

Por ello para evaluar la posible influencia de la forma de la muestra sobre los resultados obtenidos, se planteó para el caso del hormigón H-1 la comparación de muestras de 50 mm de espesor, de forma cilíndrica (*cil.*), cuadrada (*cuad.*) y rectangular (*rect.*) (Fig. 5.6), manteniendo el área de ensayo constante y tomando como referencia el área de la muestra cilíndrica de 100 mm de diámetro. El ensayo fue realizado sobre la cara superior o de moldeo debido a que los moldes prismáticos empleados presentaban una altura inferior a 200 mm. Cabe destacar que en el caso de las muestras cilíndricas, se colocó poliestireno expandido en el fondo del molde hasta una altura próxima a los 150 mm, de manera tal de generar una muestra de 50 mm de espesor. Esto último a fin de evitar que el sector de donde se extrajera la muestra afectara las determinaciones experimentales, como se verá en el punto 5.3.1.2.

La variable estudiada fue a su vez analizada considerando dos condiciones de curado diferentes: curado húmedo normalizado (*c.h.*) y estacionamiento en ambiente de laboratorio (*lab.*).



**Figura 5.6:** Muestras de diferente sección transversal: *(a)* circular, *(b)* cuadrada y *(c)* rectangular.

En la Fig. 5.7 se presentan las curvas promedio de los hormigones H-1 curados en forma normalizada (*c.h.*), correspondientes a muestras de sección cilíndrica y cuadrada, y las de los hormigones estacionados en ambiente de laboratorio (*lab.*), correspondientes a muestras con áreas de ensayo de forma cilíndrica y rectangular. En la Tabla 5.8 se informan los valores de la velocidad y capacidad de succión capilar.

Puede observarse que para ambas condiciones de curado los resultados de ensayo son dependientes de la forma de la muestra, correspondiendo los mayores valores a las de sección circular, cuestión que se torna más significativa en el caso de los hormigones estacionados en ambiente de laboratorio.

El hecho de que las muestras cilíndricas exhiban mayores parámetros de absorción puede atribuirse al menor perímetro expuesto, que crea una menor zona de interfaz o de borde donde el flujo encontraría menor resistencia lateral al ingreso a través del área de afluencia. Por otro lado, los vértices constituyen zonas de discontinuidad geométrica donde es factible que se produzca un flujo anómalo o distorsionado, hecho que no se manifiesta en el caso de las muestras cilíndricas.

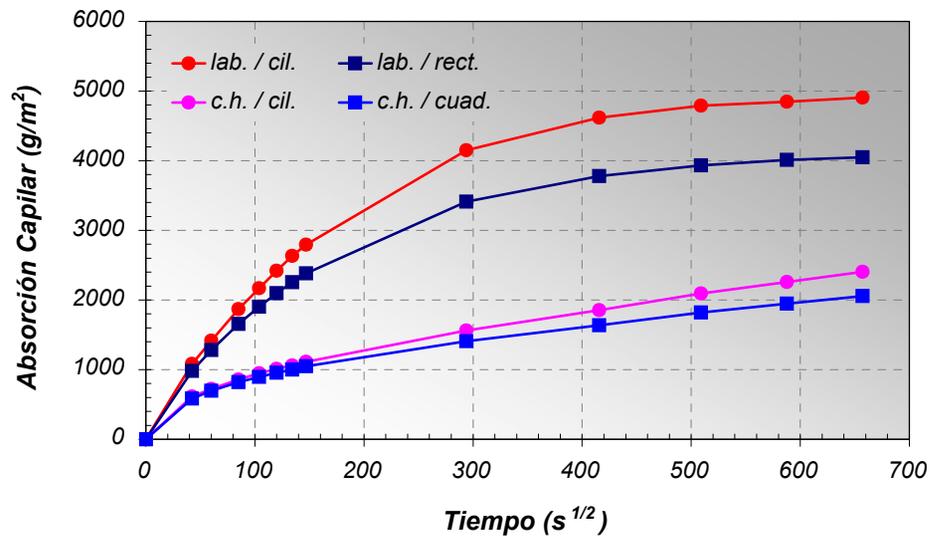


Figura 5.7: Influencia de la forma de la muestra sobre la succión capilar del hormigón H-1 curado bajo distintos regímenes.

Tabla 5.8: Parámetros de succión capilar correspondientes al hormigón H-1.

Curado	Forma	Parámetros de succión capilar				
		Velocidad (S)		Capacidad (C)		
		$S [g/(m^2 \cdot s^{1/2})]$	$R^2$	$C (g/m^2)$	$\sigma (g/m^2)$	CV
c.h.	cil.	2,9	0,98	2513	99	3,9
	cuad.	2,3	0,92	1979	223	11,3
lab.	cil.	11,9	0,95	4846	253	5,2
	rect.	7,5	0,85	3993	147	3,7

### 5.3.1.2. Ubicación de la muestra

La norma IRAM 1871 plantea la posibilidad de llevar a cabo el ensayo tanto en probetas moldeadas como en testigos calados de estructuras construidas. En este último caso, al analizar los resultados se deberá considerar la dirección de extracción del testigo, debido fundamentalmente al fenómeno de exudación.

En estado plástico los materiales componentes del hormigón tienden a permanecer en suspensión, sin embargo debido a la acción gravitatoria, se produce

el descenso de las partículas sólidas más pesadas con el simultáneo ascenso del agua, la que en su recorrido puede arrastrar partículas livianas. Luego del endurecimiento, en el hormigón aparece un gran número de poros interconectados entre sí, vestigios del flujo ascendente dejados por el agua durante su ascenso.

Debido ello, suelen aparecer diferencias tecnológicas importantes en distintos sectores de un mismo elemento, sobre todo en aquellos que son más esbeltos como tabiques o columnas, sin embargo se lo suele despreciar en elementos de altura limitada como en el caso de las losas. Por otro lado, es de destacar que la exudación se presenta con mayor magnitud en el caso de hormigones de elevada razón a/c.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se estudió la posible manifestación de dicho fenómeno en probetas de altura pequeña, mediante el ensayo de succión capilar. Ello con el fin de evaluar la necesidad de fijar el sector de donde debe extraerse la muestra, según lo establece la norma IRAM 1871, a fin de hacer comparables los resultados.

Para ello, con el hormigón H-2 se moldearon probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, sobre las que se aserraron dos muestras de 50 mm de espesor, extraídas una del sector inferior a 30 mm del fondo (*inf.*) y otra del sector superior (*sup.*) conteniendo la cara de moldeo, según se indica en la Fig. 5.8.

Simultáneamente se estudió este efecto frente a dos condiciones de curado, para lo cual los hormigones evaluados fueron curados en cámara húmeda (*c.h.*) y estacionados en ambiente de laboratorio (*lab.*).

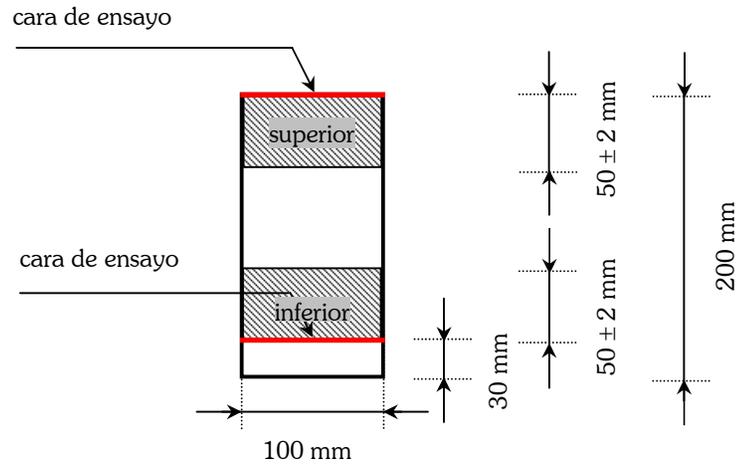


Figura 5.8: Ubicación de las muestras de ensayo en la probeta.

En la Fig. 5.9 se presentan los resultados del ensayo de succión capilar de los hormigones en estudio, y en la Tabla 5.9 la velocidad y capacidad de succión junto con los valores estadísticos correspondientes a dichos parámetros.

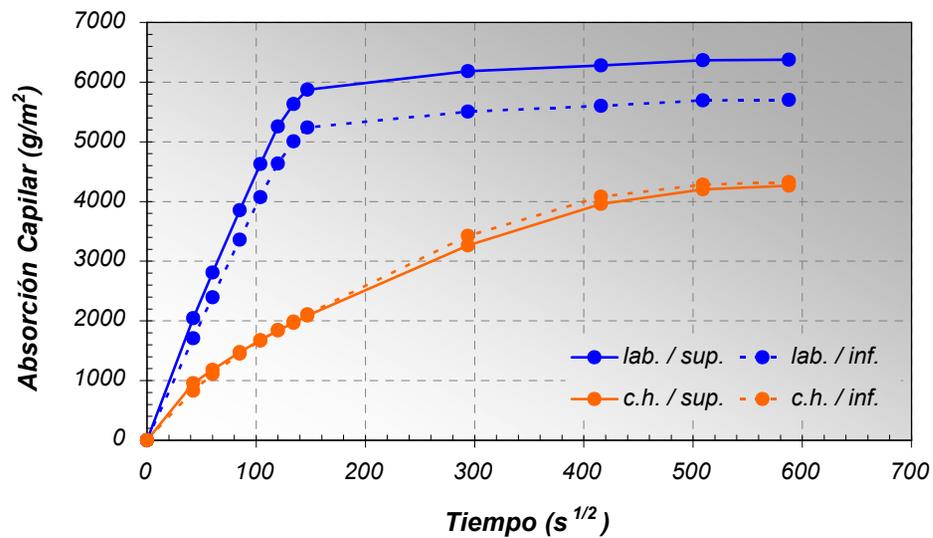


Figura 5.9: Influencia de la ubicación de la muestra sobre la succión capilar del hormigón H-2 curado bajo diferentes regímenes.

**Tabla 5.9:** Parámetros de succión capilar correspondientes al hormigón H-2.

Curado	Ubicación	Parámetros de succión capilar				
		Velocidad (S)		Capacidad (C)		
		$S [g/(m^2 \cdot s^{1/2})]$	$R^2$	$C (g/m^2)$	$\sigma (g/m^2)$	CV
c.h.	sup.	7,6	0,90	4264	411	9,6
	inf.	8,8	0,96	4326	84	2,0
lab.	sup.	39,5	0,96	6280	140	2,2
	inf.	36,2	0,98	5600	181	3,2

Puede observarse que en los hormigones curados en forma normalizada, las curvas resultaron prácticamente coincidentes, sin embargo en el caso de los hormigones estacionados en laboratorio, la separación entre las curvas resultó bien definida. Respecto a los parámetros de succión capilar, las diferencias observadas resultaron más notorias en el caso de la capacidad, hecho que se traduce en una mayor aptitud de la estructura porosa del hormigón para retener el líquido absorbido.

Si bien dichas diferencias existieron, no resultaron del todo significativas debido fundamentalmente a la altura limitada de la probeta. El hecho de que frente a un curado deficiente (con una humedad relativa cercana al 50%) se produzca un claro comportamiento diferencial, evidencia la aptitud del ensayo para distinguir hormigones de diferente calidad.

En investigaciones llevadas a cabo con anterioridad a la aprobación de la actual norma IRAM 1871, se estudió este mismo fenómeno sobre los hormigones H-3, H-4 y H-5, de razones a/c 0,40, 0,50 y 0,60, respectivamente. En este caso se realizó un análisis comparativo en tres sectores diferentes de una misma probeta, un sector superior (*sup.*), uno medio (*med.*) y otro inferior (*inf.*), según se indica en la Fig. 5.10. En todos los casos los hormigones fueron curados en forma normalizada.

El secado se efectuó hasta alcanzar una constancia de masa convenida en el 0,5%, lo cual fue obtenido aproximadamente luego de 48 h de secado. Se adoptó 10 mm como nivel del líquido de ensayo, y el registro de peso fue realizado a los 15 min, 30 min y a 1 h, 1 h 30 min, 2 h, 3 h, 8 h y 24 h. La velocidad fue calculada como la pendiente de las determinaciones experimentales de la serie de ensayo hasta las 24 h.

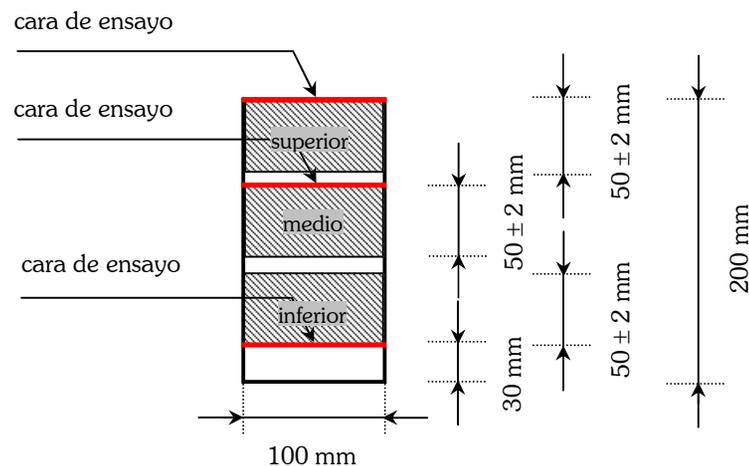


Figura 5.10: Ubicación de las muestras en la probeta.

En la Fig. 5.11 se han representado las curvas de absorción capilar en función del tiempo correspondiente a los hormigones evaluados, y en la Tabla 5.10 se presentan los resultados de la velocidad y capacidad de succión capilar.

En este estudio se observó un comportamiento diferencial entre las distintas muestras evaluadas, exhibiendo el sector superior una mayor succión que en cualquier otro sector de la probeta. Su explicación se encontraría en la sedimentación preferencial de las partículas más pesadas, que induce a una mayor proporción de agregados gruesos en el sector inferior. Ello induce a que en los otros sectores se produzca un incremento en la proporción de mortero, sumado a un ligero y gradual aumento de la razón a/c conforme aumenta la altura de la probeta de donde es extraída la muestra.

Un aspecto a destacar lo constituye el hecho de que las diferencias entre los parámetros de succión capilar obtenidos en los distintos sectores de la probeta se acentuaron con el incremento de la razón a/c de la mezcla.

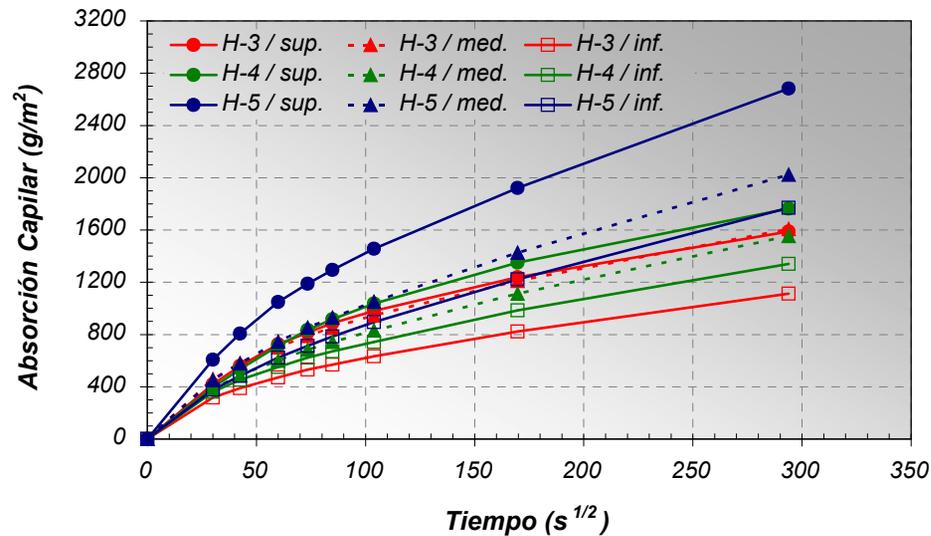


Figura 5.11: Influencia de la ubicación de la muestra sobre la succión capilar de los hormigones H-3, H-4 y H-5.

Tabla 5.10: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-3, H-4 y H-5.

Hormigón	Ubicación	Parámetros de succión capilar				
		Velocidad (S)		Capacidad (C)		
		$S [g/(m^2 \cdot s^{1/2})]$	$R^2$	$C (g/m^2)$	$\sigma (g/m^2)$	CV
H-3	sup.	4,2	0,93	1587	57	3,6
	med.	4,2	0,95	1609	124	7,7
	inf.	2,9	0,98	1112	37	3,3
H-4	sup.	5,0	0,93	1763	117	6,6
	med.	4,3	0,96	1553	111	7,1
	inf.	3,6	0,93	1341	129	9,6
H-5	sup.	7,5	0,95	2682	130	4,8
	med.	5,8	0,98	2025	36	1,8
	inf.	5,2	0,97	1770	132	7,5

### 5.3.1.3. Superficie de afluencia

La norma IRAM 1871 establece el empleo de muestras cilíndricas de 50 mm de espesor, estando definido el diámetro por el tamaño máximo del agregado grueso del hormigón evaluado. En base a esto corresponderían ensayar muestras de 100 mm de diámetro nominal, cuando la totalidad del agregado grueso empleado pase por el tamiz de abertura de malla 25 mm, y de 150 mm de diámetro, cuando la totalidad del agregado grueso pase por el tamiz de abertura 37,5 mm.

Sin embargo puede suceder que lo anterior no se cumpla estrictamente, ya sea por desconocimiento o simplemente porque no se disponga de muestras que se ajusten a dicha relación. Esto último suele darse debido a que las probetas que habitualmente se moldean para el control de obra suelen ser los típicos cilindros de 150 x 300 mm, independientemente del tipo de hormigón elaborado.

En base a ello se analizó comparativamente la respuesta frente al transporte de agua por capilaridad de muestras hormigón de igual forma pero de diferente área transversal. Se trabajó con el hormigón H-7, elaborado con agregados gruesos de 19 mm de tamaño máximo, del cual se moldearon probetas cilíndricas de 100 x 200 mm y de 150 x 300 mm, sobre las que se aserraron muestras de 50 mm de espesor.

En la Fig. 5.12 se presentan las curvas promedio de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo, correspondientes a muestras cilíndricas de 100 y 150 mm de diámetro, mientras que en la Tabla 5.11 se muestran los valores obtenidos de los parámetros de ensayo.

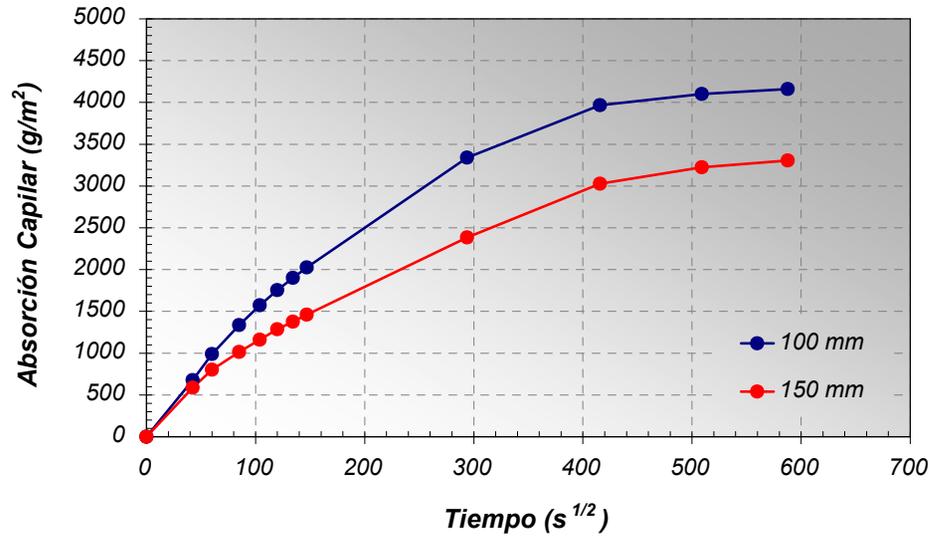


Figura 5.12: Influencia del área de ensayo sobre la succión capilar del hormigón H-7.

Tabla 5.11: Parámetros de succión capilar correspondientes al hormigón H-7.

Diámetro	Parámetros de succión capilar				
	Velocidad (S)		Capacidad (C)		
	S [g/(m².s <sup>1/2</sup> )]	R <sup>2</sup>	C (g/m²)	σ (g/m²)	CV
100 mm	10,0	0,94	4130	53	1,3
150 mm	6,4	0,98	3307	4	0,1

Podría presumirse en una primera instancia que los resultados obtenidos en ambos tipos de probetas resultarían similares, debido a que la absorción acumulada en el tiempo es referida al área de la sección transversal de la muestra. Sin embargo, dichos resultados manifiestan la dependencia de los parámetros de succión capilar con la superficie de la sección transversal. Los mayores valores, tanto de la capacidad como de la velocidad de succión, se hallaron en las muestras de menor sección transversal, es decir en aquellas de 100 mm de diámetro.

Si se analizan conjuntamente estos resultados con los hallados en el punto 5.3.1.1, donde los parámetros de succión capilar dependían de la forma de la muestra para igualdad de áreas, puede inferirse que los parámetros de ensayo son

exclusivamente dependientes del perímetro de la muestra, e indirectamente de la forma y magnitud de la sección transversal.

Por lo tanto, los parámetros de succión capilar hallados en muestras de diferente diámetro no resultan comparables. Este hecho es necesario tenerlo en cuenta al pretender evaluar la calidad de un determinado hormigón respecto al transporte capilar, sobre todo si sólo se dispone de muestras de 150 mm de diámetro. En este caso se estaría sobreestimando la calidad del hormigón estudiado, debido a la obtención de parámetros de succión de menor magnitud.

#### **5.3.1.4. Probeta / Testigo**

Mediante la extracción de testigos es posible evaluar la calidad del hormigón con el cual fue construida una determinada estructura. Si bien la norma IRAM 1871 es también aplicable al caso de testigos, el Proyecto de Reglamento CIRSOC 201: 2005 establece sólo una limitación máxima al valor de la velocidad de succión capilar, para el caso de muestras extraídas de probetas de 100 mm de diámetro.

Con el objeto de evaluar la posibilidad de hacer extensiva esta limitación al caso de testigos, se analizó comparativamente el comportamiento de muestras extraídas de probetas moldeadas y de testigos calados.

Para ello se trabajó con el hormigón H-7, del cual se moldearon probetas cilíndricas, de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura y cubos de 200 mm de arista, aplicando en todos los casos un curado normalizado. Sobre estos últimos se calaron testigos de iguales dimensiones que las probetas en coincidencia con la dirección de llenado, de manera de minimizar factores de carácter secundario que pudieran afectar las determinaciones experimentales. En ambos casos las muestras ensayadas se extrajeron a 30 mm del fondo.

En la Fig. 5.13 se presentan las curvas promedio correspondientes a las muestras extraídas de probetas y testigos, y en la Tabla 5.12 se informan los parámetros hallados en cada caso.

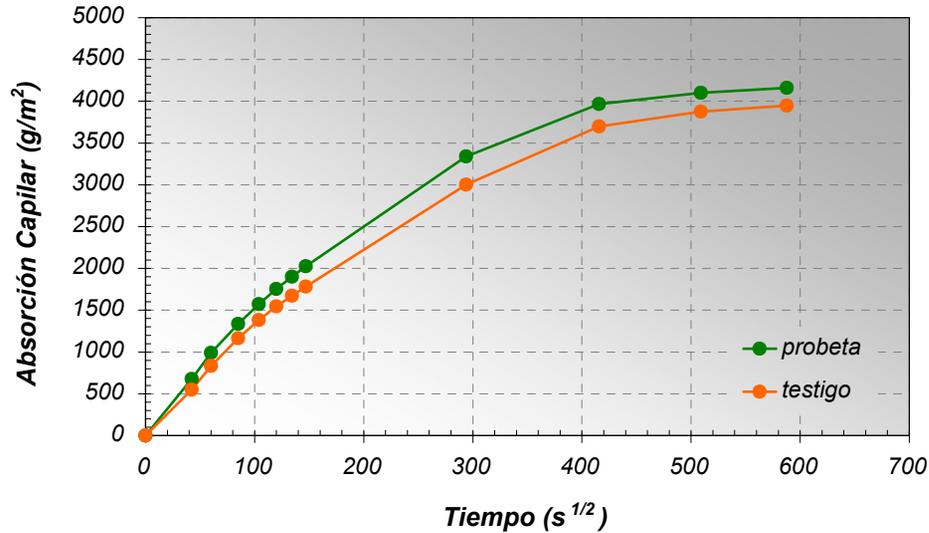


Figura 5.13: Influencia del tipo de muestra sobre la succión capilar del hormigón H-7.

Tabla 5.12: Parámetros de succión capilar correspondientes al hormigón H-7.

Muestra	Parámetros de succión capilar				
	Velocidad (S)		Capacidad (C)		
	S [g/(m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> )]	R <sup>2</sup>	C (g/m <sup>2</sup> )	σ (g/m <sup>2</sup> )	CV
probeta	10,0	0,94	4130	53	1,3
testigo	8,2	0,93	3931	22	0,6

Puede observarse que ambos tipos de muestras exhiben similar comportamiento. A cada instante de ensayo, la curva correspondiente a muestras extraídas de probetas moldeadas presenta mayor absorción acumulada, manteniendo prácticamente constante la diferencia respecto a la de las muestras obtenidas de testigos calados.

La explicación al comportamiento observado puede ser atribuida a cierto “efecto de molde” o su análogo “efecto de encofrado” que se observa en la

práctica, debido fundamentalmente a las operaciones de compactación. Dicho fenómeno se refiere a la acumulación de mortero contra las paredes del molde, generando una zona de menor calidad que la correspondiente a la del hormigón interior. De esta forma, las muestras extraídas de probetas estarían afectadas por dicho fenómeno en todo su perímetro, resultando nulo este efecto en el caso de las obtenidas de testigos calados.

Si bien se observó un incremento en los parámetros de succión capilar de las muestras provenientes de probetas, es de destacar que las diferencias halladas no resultaron sustanciales. Por otro lado, debe tenerse en cuenta que los resultados obtenidos correspondieron a muestras extraídas a la misma altura y ensayadas en correspondencia con la dirección de llenado, cuestión que no siempre sucede durante la práctica de extracción de testigos.

En base a lo anteriormente expuesto, valdrían las observaciones del Proyecto de Reglamento CIRSOC 201: 2005, tanto para el caso de muestras tomadas de probetas como de testigos, ensayadas en dirección paralela a la del llenado. Es esperable un comportamiento diferencial en el caso de muestras ensayadas en otra dirección a la analizada y en hormigones de diferentes características tecnológicas al estudiado.

### **5.3.2. Factores relativos a la técnica de ensayo**

#### **5.3.2.1. Nivel de agua**

Respecto al nivel de agua a adoptar en el ensayo, la norma IRAM estipula la inmersión de las muestras a una profundidad de  $3 \pm 1$  mm, lo cual implica que para el límite superior la profundidad de inmersión resultaría el doble de la correspondiente al límite inferior. Esto motivó el interés por evaluar la posible influencia del nivel de agua adoptado, dentro del rango impuesto por la norma, sobre los parámetros de absorción de agua por capilaridad.

La evaluación se llevó a cabo sobre hormigones de diferente nivel resistente, H-6 y H-7, de razones a/c 0,45 y 0,65, respectivamente. En la Fig. 5.14 se presentan las curvas obtenidas en el ensayo de muestras inmersas a profundidades de 2 y 4 mm, y en la Tabla 5.13 se indican los valores de la velocidad y capacidad de succión capilar para cada caso.

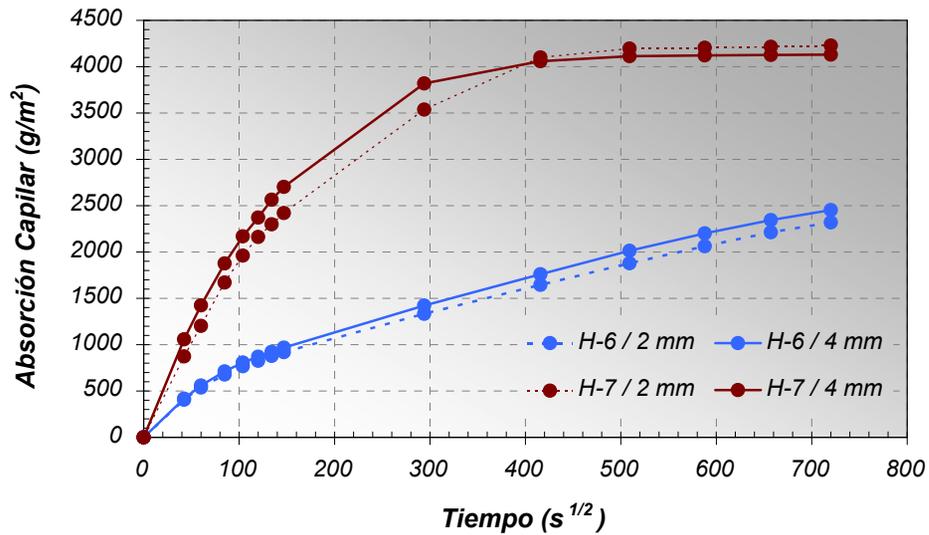


Figura 5.14: Influencia del nivel de agua sobre la succión capilar de los hormigones H-6 y H-7.

Tabla 5.13: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-6 y H-7.

Hormigón	Nivel de agua	Parámetros de succión capilar				
		Velocidad (S)		Capacidad (C)		
		S [g/(m² .s <sup>1/2</sup> )]	R <sup>2</sup>	C (g/m²)	σ (g/m²)	CV
H-6	2 mm	2,9	0,98	2319	111	4,8
	4 mm	3,0	0,96	2453	194	7,9
H-7	2 mm	10,2	0,91	4101	100	2,4
	4 mm	10,6	0,92	4060	89	2,2

De la observación gráfica y de la magnitud de los parámetros hallados, es posible apreciar una ligera tendencia al aumento de la absorción de agua por capilaridad conforme se incrementa la profundidad de inmersión de la muestra ensayada.

Teniendo en cuenta que las diferencias encontradas no resultaron significativas, sobre todo si se considera que el análisis fue realizado sobre hormigones de diferente nivel resistente y para los dos límites extremos de profundidad de inmersión, podría considerarse que la fluctuación del nivel de agua dentro del rango establecido por la norma IRAM, no modifica los resultados hallados. Sin embargo es recomendable no exceder el límite máximo, ya que podrían obtenerse resultados erróneos sobre un mismo hormigón.

#### 5.3.2.2. Temperatura de secado

El estudio de la influencia de la temperatura de secado aplicada durante el pre-acondicionamiento de las muestras no es aún un tema resuelto, existiendo gran controversia en el ámbito internacional (Hall y Hoff, 2002; Reda Taha *et al.*, 2001; Sosoro, 1998). Sumado a ello, el hecho de no disponer en ciertas circunstancias de estufas de accionamiento digital, a través de las cuales se pueda asegurar un nivel continuo y sostenido de la temperatura, hace imperiosa la necesidad de estudiar dicha influencia sobre los resultados obtenidos.

Con el fin de evaluar el efecto de la temperatura de secado, sobre los hormigones H-6 y H-7 se plantearon dos niveles de temperatura, uno en correspondencia con la norma IRAM 1871 a 50°C y otro a 75°C. Esta última temperatura fue adoptada considerando un valor intermedio entre el propuesto por dicha norma y los 100°C considerados por la bibliografía como límite a partir del cual podrían aparecer daños microestructurales en la muestra. En ambos casos las muestras fueron colocadas en estufa hasta lograr la constancia de masa, convenida en el 0,1% entre pesadas consecutivas efectuadas cada 24 h. Seguidamente se realizó el ensayo siguiendo la metodología descrita en la norma IRAM 1871.

En la Fig. 5.15 se presentan las curvas de absorción capilar correspondientes a los hormigones H-6 y H-7, y en la Tabla 5.14 se indican los resultados de la velocidad y capacidad de succión capilar.

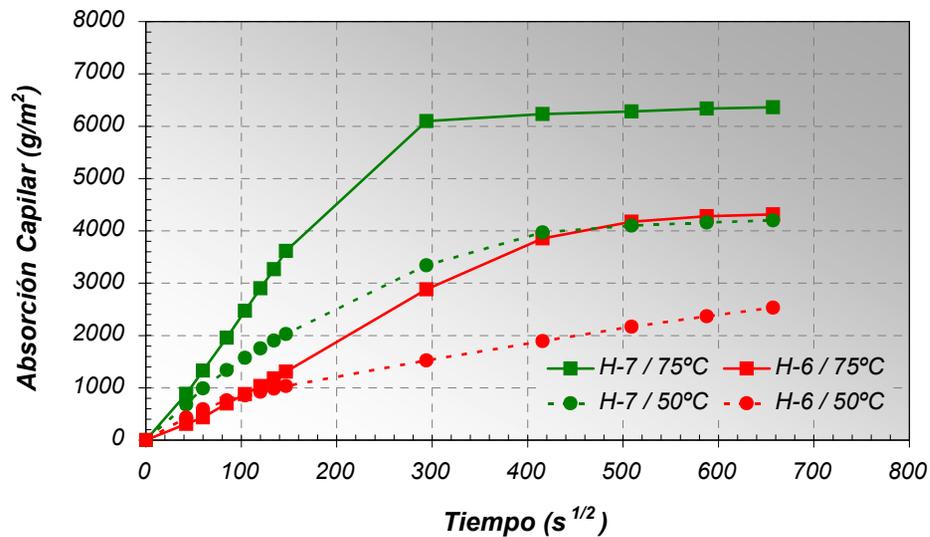


Figura 5.15: Influencia de la temperatura de secado sobre la succión capilar de los hormigones H-6 y H-7.

Tabla 5.14: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-6 y H-7.

Hormigón	Temperatura de secado	Parámetros de succión capilar				
		Velocidad (S)		Capacidad (C)		
		S [g/(m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> )]	R <sup>2</sup>	C (g/m <sup>2</sup> )	σ (g/m <sup>2</sup> )	CV
H-6	50°C	3,2	0,93	2624	300	11,4
	75°C	9,9	0,99	4296	571	13,3
H-7	50°C	10,0	0,94	4130	53	1,3
	75°C	26,2	0,99	6256	173	2,8

De los resultados obtenidos es posible observar que los parámetros de succión capilar aumentan considerablemente cuando la temperatura de secado se incrementa de 50 a 75°C, resultando por lo tanto de suma importancia el control estricto de este factor. Así, la capacidad evidenció incrementos comprendidos entre el 50 y el 60% y la velocidad resultó entre 2,5 y 3 veces la correspondiente al secado efectuado a 50°C, resultando sensiblemente más afectado el hormigón de mayor calidad.

El comportamiento observado puede entenderse si se considera que en los hormigones de mayor razón a/c, la proporción relativa del agua evaporable resulta menor a la de los hormigones de menor razón a/c, al variar la temperatura de 50 a 75 °C. En otras palabras, la remoción del agua libre a una temperatura de 50°C durante el tiempo necesario para adquirir la constancia de masa, supone una proporción significativa del agua libre evaporada que poco se incrementa al aumentar la temperatura a 75°C. En el caso de los hormigones de mayor nivel resistente, debido a la existencia de una estructura porosa más cerrada, es necesario una temperatura más elevada para producir una remoción del agua del sistema proporcionalmente comparable con los hormigones de mayor razón a/c.

En base a lo observado, las discrepancias asociadas a diferentes temperaturas de secado afectan las determinaciones experimentales. De allí la relevancia que adquiere esta variable cuando no se cuenta con el equipamiento adecuado para asegurar un nivel constante de temperatura durante el secado, fundamentalmente cuando las fluctuaciones propias de la estufa puedan afectar las determinaciones de la masa seca y por ende modificar el período de secado.

### **5.3.3. Factores relativos a las características tecnológicas del hormigón evaluado**

#### **5.3.3.1. Razón a/c**

Uno de los parámetros composicionales de mayor importancia en el diseño de mezclas de hormigón limitado por las condiciones resistentes y medioambientales, lo constituye la razón a/c. De su elección y de una apropiada metodología de curado dependerá el adecuado comportamiento de la estructura durante su vida en servicio. Ambos parámetros se encuentran intrínsecamente ligados, resultando muy notoria su influencia en la gran mayoría de los casos.

En este punto se pretende exponer la influencia de la razón a/c sobre el transporte de agua por capilaridad en hormigones curados en forma normalizada,

elaborados con materiales locales, y llevando a cabo el ensayo cumpliendo estrictamente lo dispuesto en la norma IRAM 1871.

Para ello se trabajó con hormigones elaborados con agregados gruesos de 19 mm de tamaño máximo, empleando piedra partida granítica (PPG) (H-7, H-8, H-10, H-13 y H-14), piedra partida basáltica (PPB) (H-15 y H-16), piedra partida cuarcítica (PPC) (H-17 y H-18), y canto rodado síliceo (CRS) (H-19 y H-20). En las Figs. 5.16 y 5.17 se presentan los valores promedio de la velocidad y capacidad de succión capilar en función de la razón a/c.

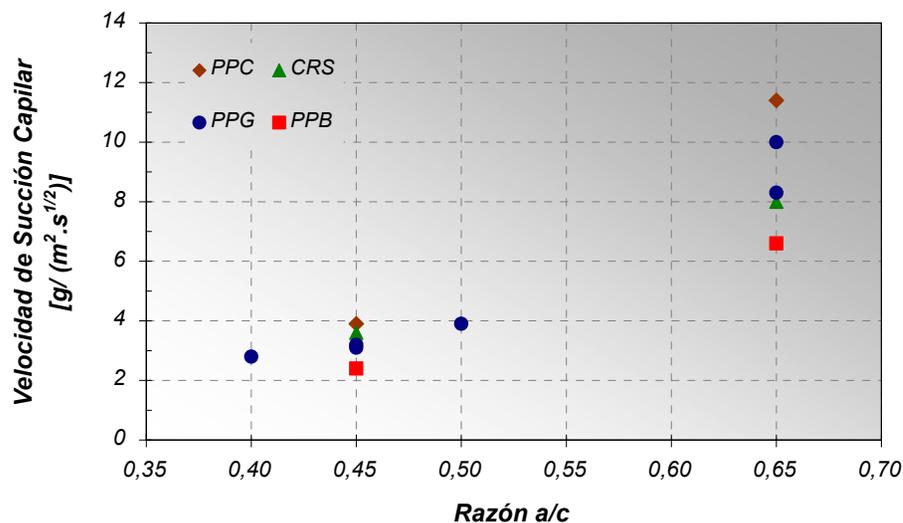


Figura 5.16: Influencia de la razón a/c sobre la velocidad de succión capilar.

Es posible observar un claro comportamiento diferencial de los hormigones en función de la razón a/c. Como era de esperar, los resultados muestran que la velocidad y capacidad de succión capilar resultan mayores conforme aumenta la razón a/c. Ello se debe a que en hormigones de mayor nivel resistente (menor razón a/c), el volumen de poros capilares es menor y a igualdad en las condiciones de curado, la hidratación alcanzada genera una mayor tortuosidad relativa en la estructura porosa. Una mayor tortuosidad y segmentación de los capilares se traduce en parámetros de transporte de menor magnitud.

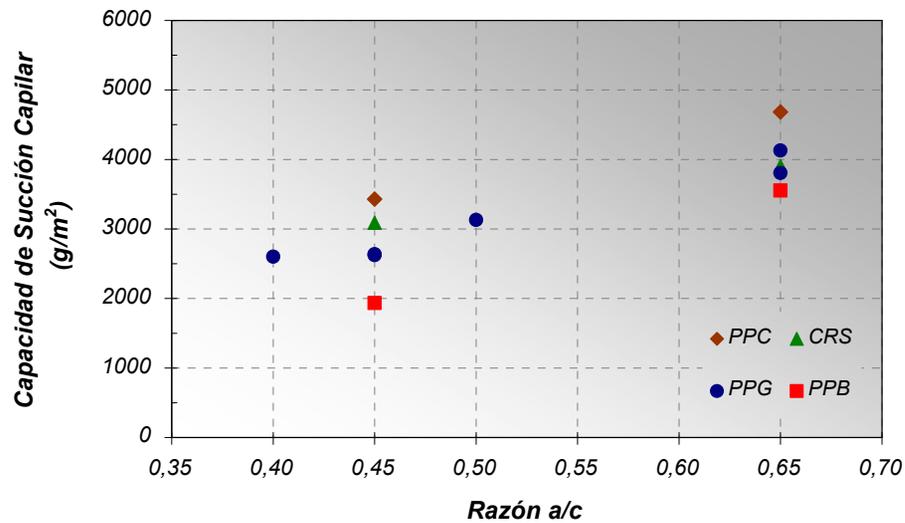


Figura 5.17: Influencia de la razón a/c sobre la capacidad de succión capilar.

Cabe destacar que los valores informados corresponden a hormigones elaborados con distinto tipo de agregado grueso, donde las características propias del agregado, como sus propiedades físicas y su forma, afectan de diferente modo las características del hormigón resultante, como se verá en el punto 5.3.3.3. Por ello es esperable que entre hormigones de similares características tecnológicas, se manifieste una tendencia aún más definida.

### 5.3.3.2. Tipos de cemento

El comportamiento del hormigón frente al transporte de agua por capilaridad está determinado por su estructura porosa, siendo por lo tanto el tipo de cemento uno de los factores más importantes a considerar.

Desde hace algunos años, esta variable ha cobrado especial interés debido al progresivo desarrollo de los llamados cementos compuestos y a la aparición de diferentes materiales empleados como adiciones en la elaboración del hormigón. Debido a la diversidad de cementos disponibles en el mercado, en cuanto a tipo y

procedencia, e incluso a la variabilidad existente en partidas de un mismo cemento, el grado de hidratación y el nivel de segmentación alcanzadas por la matriz pueden variar considerablemente.

Teniendo en cuenta esto último se planteó un estudio comparativo, respecto al transporte de agua por capilaridad, de hormigones elaborados con distintos cementos comerciales. Para ello se elaboraron hormigones de razón a/c 0,50, H-10, H-11 y H-12, empleando tres tipos diferentes de cementos: cemento portland compuesto (CPC 40), cemento portland normal (CPN 40), y cemento de alto horno de alta resistencia a los sulfatos (CAH 40, ARS), respectivamente. Las características físico-químicas de los cementos utilizados fueron detalladas en la Tabla 5.1.

Debido a la estrecha vinculación existente entre la hidratación de la matriz cementícea y las condiciones de curado, se estudió además la influencia del tipo de cemento bajo diferentes condiciones de curado, para lo cual los hormigones se sometieron a curado normalizado (c.h.) y al estacionamiento en ambiente de laboratorio (lab.). El ensayo de succión capilar se realizó a la edad de 90 días a fin de permitir cierto desarrollo de la reacción puzolánica de la escoria.

En la Fig. 5.18 se presentan las curvas promedio de absorción capilar de los distintos hormigones bajo los diferentes curados evaluados, y en la Tabla 5.15 se exponen los resultados de los parámetros de ensayo.

En base a los resultados obtenidos se puede apreciar que los mayores valores de los parámetros de succión capilar fueron exhibidos en los hormigones elaborados con cemento CPC, fundamentalmente en aquellos estacionados en laboratorio. Este comportamiento es atribuido a la elevada proporción de filler (18%), el cual si bien dispersa las partículas de cemento contribuyendo a una mejor hidratación, como contrapartida por ser un material que no genera compuestos hidráulicos, su reemplazo por cemento indirectamente eleva la razón a/c

produciendo hormigones más porosos, hecho que se acentúa bajo condiciones deficientes de curado.

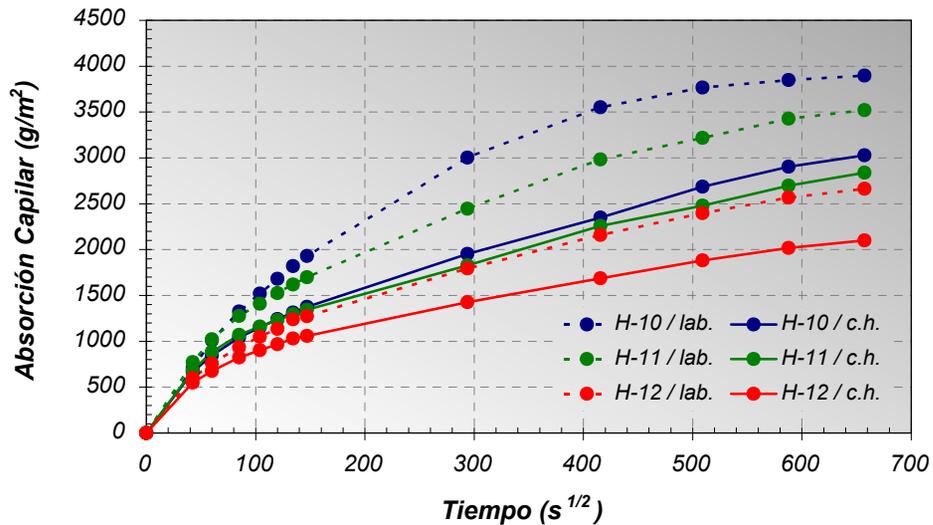


Figura 5.18: Influencia del tipo de cemento sobre la succión capilar de los hormigones H-10, H-11 y H-12.

Tabla 5.15: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-10, H-11 y H-12.

Hormigón	Curado	Parámetros de succión capilar				
		Velocidad (S)		Capacidad (C)		
		S [g/(m².s <sup>1/2</sup> )]	R <sup>2</sup>	C (g/m²)	σ (g/m²)	CV
H-10	c.h.	3,9	0,96	3131	142	4,5
	lab.	7,7	0,94	3850	137	3,6
H-11	c.h.	3,6	0,97	2877	115	4,0
	lab.	5,0	0,94	3520	143	4,1
H-12	c.h.	2,7	0,95	2076	135	6,5
	lab.	3,5	0,93	2639	123	4,6

Las mejores respuestas ante el transporte capilar se obtuvieron en los hormigones elaborados con cemento CAH, debido a las propiedades altamente puzolánicas y cementantes de las escorias. Éstas provocan el refinamiento de los poros y un incremento en la tortuosidad de los capilares que se traduce en una mejor respuesta del hormigón ante el ingreso de agentes externos por capilaridad.

Comparativamente con los otros cementos analizados, el cemento CAH presentó una mayor finura, lo cual conduce a una mejor hidratación y a una consecuente reducción de la porosidad.

Los hormigones elaborados con cemento CPN mostraron un comportamiento intermedio entre los dos anteriores, debido a que prácticamente la hidratación del cemento está sólo determinada por la formación de C-S-H a partir de sus constituyentes mineralógicos.

Un aspecto a destacar lo constituye el hecho de que el valor de la velocidad de succión capilar obtenido en los hormigones elaborados con cementos CPC, está muy próximo al límite máximo admisible impuesto por el Proyecto de Reglamento CIRSOC 201: 2005, el cual es de  $4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ . Debido a que este tipo de cemento se ha constituido en el de mayor uso en nuestro país, es importante tener en cuenta que al evaluar hormigones elaborados con cemento CPC podría no cumplirse con dicho límite.

### **5.3.3.3. Tipos de agregados gruesos**

#### **5.3.3.3.1. Agregados gruesos naturales**

Es sabido que los mecanismos de transporte se producen a través de la red de poros capilares de la pasta de cemento, aunque la existencia de agregados gruesos de elevada permeabilidad puede incrementar considerablemente los parámetros medidos. Por otro lado, ciertas características intrínsecas del agregado como la forma y textura, pueden modificar el comportamiento durable del hormigón, al producir modificaciones en la zona de interfase.

La incorporación de agregados a la pasta de cemento incrementa la permeabilidad debido a que crea zonas de debilidad (interfases), produce una incompatibilidad mecánica y reológica entre la pasta y el agregado que conlleva al

micro-agrietamiento de la matriz (Mindess y Young, 1981; Mehta y Monteiro, 1998). Este efecto dependerá no sólo de la matriz de cemento, sino también de las características propias del agregado grueso empleado.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó un estudio centrado en la modificación que puede producir el empleo de distintos tipos de agregados gruesos sobre la absorción de agua por capilaridad. Para ello se analizó comparativamente la respuesta de hormigones de distinto nivel resistente (razón a/c 0,45 y 0,65), elaborados con piedra partida granítica (H-13 y H-14), piedra partida basáltica (H-15 y H-16), piedra partida cuarcítica (H-17 y H-18) y canto rodado silíceo (H-19 y H-20), de 19 mm de tamaño máximo y curados en forma normalizada. Las características físicas de dichos agregados se encuentran detalladas en la Tabla 5.2.

En la Fig. 5.19 se han representado las curvas de absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo, de los hormigones H-13 a H-20 y en la Tabla 5.16 se presentan los parámetros de succión capilar.

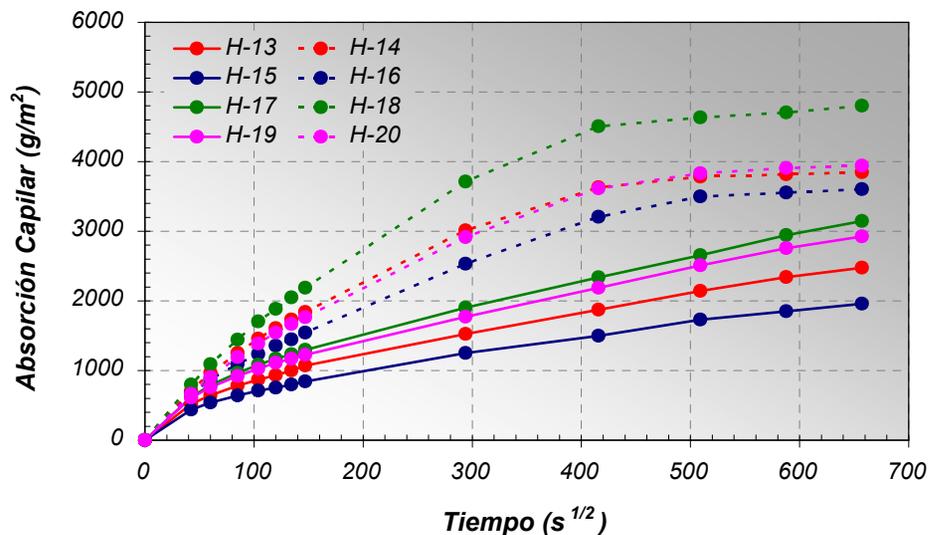


Figura 5.19: Influencia del tipo agregado grueso sobre la succión capilar de los hormigones H-13 a H-20.

**Tabla 5.16:** Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-13 a H-20.

<i>Hormigón</i>	<i>Parámetros de succión capilar</i>				
	<i>Velocidad (S)</i>		<i>Capacidad (C)</i>		
	<i>S [g/(m<sup>2</sup>.s<sup>1/2</sup>)]</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>C (g/m<sup>2</sup>)</i>	<i>σ (g/m<sup>2</sup>)</i>	<i>CV</i>
H-13	3,1	0,96	2638	127	4,8
H-14	8,3	0,93	3806	153	4,0
H-15	2,4	0,96	1936	270	13,9
H-16	6,6	0,98	3553	152	4,3
H-17	3,9	0,98	3430	108	3,1
H-18	11,4	0,99	4683	142	3,0
H-19	3,6	0,96	3090	247	8,0
H-20	8,0	0,95	3908	150	3,8

Se pueden apreciar dos grupos bien definidos, uno superior correspondiente a los hormigones de razón a/c 0,65 y otro inferior de razón a/c 0,45, a su vez en cada grupo existe también una diferenciación dada por el tipo de agregado grueso utilizado. En ambos casos se observa la misma tendencia, donde la mayor absorción se presenta en los hormigones elaborados con cuarcita, siguiéndole en orden decreciente los elaborados con rodado silíceo, granito y por último los elaborados con basalto.

Los mayores parámetros de transporte exhibidos en los hormigones elaborados con cuarcita (H-17 y H-18) se atribuyen fundamentalmente a la mayor porosidad y absorción de este agregado, el cual participa en el transporte capilar. En la Fig. 5.19 puede observarse que la succión capilar de dichos hormigones decrece más abruptamente con la razón a/c que en el resto de los hormigones analizados. Cuanto mayor es la razón a/c tanto más permeable y porosa resulta la matriz y por ende se torna más importante la participación de los agregados gruesos en el mecanismo de transporte.

Los hormigones elaborados con canto rodado (H-19 y H-20) presentaron un desempeño inferior al de los elaborados con granito y basalto, atribuible a la textura lisa que confiere una interfase de menor calidad y adherencia.

En cuanto a los parámetros de succión capilar, en todos los casos se obtiene una correlación bastante ajustada de la velocidad, respecto a la capacidad y en el caso de los hormigones de razón a/c 0,65, se observa un incremento en la dispersión de los datos conforme aumenta la calidad del agregado grueso.

#### 5.3.3.3.2. Agregados gruesos reciclados

Una clase particular de agregados la constituyen los llamados agregados reciclados obtenidos de la trituración de hormigones de desecho. Estos agregados surgen como solución a la creciente demanda de materia prima, como medio de preservación de los recursos naturales y además con el fin de reducir los problemas de contaminación, cuando la disposición de los residuos de construcción se realiza en sitios inadecuados.

Los agregados reciclados presentan como característica distintiva en su constitución la presencia de mortero proveniente del hormigón original, motivo por el cual poseen una alta porosidad y absorción (Hansen, 1986; Zega y Di Maio, 2007), que hacen del hormigón resultante un material con propiedades particulares.

Existe una gran cantidad de estudios que analizan el comportamiento mecánico del hormigón reciclado (Hansen y Narud, 1983; Poon *et al.*, 2004; Di Maio *et al.*, 2005), y algunos pocos relativos al comportamiento durable (Wirquin *et al.*, 2000; Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva, 2002; Zaharieva *et al.*, 2004), sobre todo para porcentajes elevados de reemplazo.

Con el objetivo de extender el conocimiento disponible de estos hormigones desde el punto de vista durable, se analizó respecto al transporte por capilaridad, el comportamiento de hormigones elaborados con un 75% de reemplazo en volumen del agregado grueso natural, por agregados gruesos obtenidos de la trituración de hormigones de desechos de diferentes niveles resistentes. La respuesta de estos

hormigones fue analizada comparativamente con la presentada por hormigones convencionales, elaborados con el mismo conjunto de materiales pero empleando en su totalidad agregados gruesos naturales, del mismo tipo que la que poseían los agregados reciclados.

Debido a que este estudio fue llevado a cabo con anterioridad a la aprobación de la actual norma IRAM 1871, existen algunas variantes en la metodología de ensayo que se detallan a continuación. Se emplearon prismas de 70 x 100 x 50 mm obtenidos del aserrado de probetas prismáticas de 70 x 100 x 430 mm. La cantidad de agua absorbida se obtuvo como la ganancia de masa a los 30 min y a 1 h, 3 h, 6 h, 24 h, 48 h y cada  $24 \pm 1$  h hasta que la variación de masa de la probeta resultó menor del 0,2% entre dos determinaciones sucesivas.

En la Fig. 5.20 se presentan las curvas de absorción capilar correspondientes a los hormigones reciclados (H-21 y H-22) y convencionales (H-23 y H-24) de razones a/c 0,40 y 0,50, respectivamente. En la Tabla 5.17 se presentan los valores de la velocidad y capacidad de succión capilar de las series evaluadas.

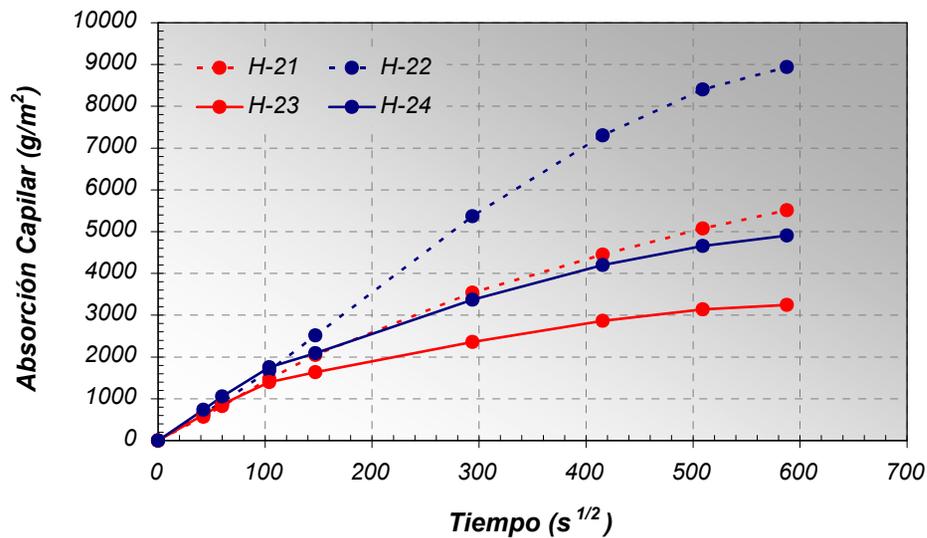


Figura 5.20: Influencia del empleo de agregados gruesos reciclados sobre la succión capilar de los hormigones H-21 a H-24.

**Tabla 5.17:** Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-21 a H-24.

<i>Hormigón</i>	<i>Parámetros de succión capilar</i>				
	<i>Velocidad (S)</i>		<i>Capacidad (C)</i>		
	<i>S [g/(m<sup>2</sup>.s<sup>1/2</sup>)]</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>C (g/m<sup>2</sup>)</i>	<i>σ (g/m<sup>2</sup>)</i>	<i>CV</i>
H-21	9,8	0,98	5856	270	4,6
H-22	17,1	0,99	9218	393	4,3
H-23	5,8	0,93	3139	132	4,2
H-24	8,9	0,96	4904	263	5,4

Se observa claramente la mayor absorción experimentada por los hormigones elaborados con agregados reciclados, consecuencia de la elevada porosidad de éstos últimos. Dichos agregados presentan en su composición restos de matriz del hormigón original del cual fueron obtenidos, de allí que los hormigones reciclados posean una mayor proporción de pasta de cemento que la de un hormigón convencional.

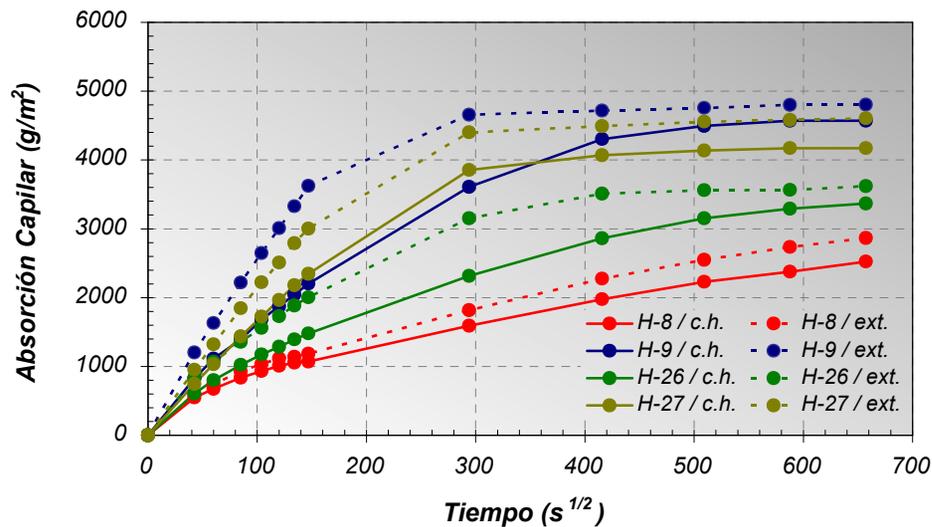
Los resultados obtenidos confirman que para una misma razón a/c, los hormigones reciclados presentan absorciones superiores a la de los convencionales. La velocidad de succión capilar se incrementó un 90% en el caso de los hormigones de razón a/c 0,50 y un 70% en el caso de los hormigones de razón a/c 0,40, mientras que las capacidades de succión exhibieron un incremento cercano al 90%. Lo anterior puede explicarse considerando el hecho de que a menor razón a/c la matriz cementícea resulta más cerrada, lo que se traduce en una menor porosidad total e interconectividad, que limita la contribución de los agregados reciclados en el transporte capilar.

#### 5.3.3.4. Tamaño máximo del agregado grueso

Otra variable tecnológica analizada con el fin de determinar la posible modificación de la succión capilar experimentada en hormigones, está relacionada con el tamaño máximo del agregado grueso.

Para ello se trabajó con los hormigones H-8 y H-9 de razón a/c 0,40 y 0,60, elaborados con agregados gruesos de 19 mm de tamaño máximo, y con los hormigones H-26 y H-27 también de razón a/c 0,40 y 0,60, con agregados de 25 mm de tamaño máximo. Ambos grupos fueron elaborados con piedra partida granítica, caracterizada por su baja absorción, con el objeto de evitar que la absorción propia del agregado afectara la variable a estudiar.

En la Fig. 5.21 se presentan los resultados de los hormigones en estudio para diferentes condiciones de curado (curado húmedo y estacionamiento al exterior) y en la Tabla 5.18 los parámetros obtenidos en el ensayo.



**Figura 5.21:** Influencia del tamaño máximo del agregado grueso sobre la succión capilar de los hormigones H-8, H-9, H-26 y H-27.

Puede observarse que independientemente de las condiciones de curado para los tamaños máximos analizados, los hormigones de baja razón a/c evidenciaron un incremento en los parámetros de succión capilar con el aumento del tamaño máximo del agregado grueso. Este comportamiento estaría en correspondencia con lo observado en el caso de la permeabilidad, donde el

incremento del tamaño máximo altera la interfase produciendo aumentos en la permeabilidad del sistema (Mehta y Monteiro, 1998).

**Tabla 5.18:** Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-8, H-9, H-26 y H-27.

Hormigón	Curado	Parámetros de succión capilar				
		Velocidad (S)		Capacidad (C)		
		$S [g/(m^2 \cdot s^{1/2})]$	$R^2$	$C (g/m^2)$	$\sigma (g/m^2)$	CV
H-8	c.h.	2,8	0,92	2602	250	9,6
	ext.	3,9	0,98	2971	387	13,0
H-9	c.h.	9,5	0,94	4540	291	6,4
	ext.	23,1	0,99	4718	278	5,9
H-26	c.h.	4,7	0,91	3360	222	6,6
	ext.	9,2	0,97	3561	89	2,5
H-27	c.h.	15,4	0,98	4138	13	0,3
	ext.	19,7	0,93	4492	169	3,8

Sin embargo, en el caso de los hormigones de mayor razón a/c no fue posible apreciar una tendencia definida. La alta porosidad adquirida por la matriz y la baja calidad de la interfase se tornaron dominantes y la influencia del tamaño máximo del agregado grueso no fue posible distinguirla claramente. Es de destacar el hecho de que el estudio se centró en hormigones elaborados con agregados de tamaños máximos de uso más frecuente, donde la diferencia entre dichos tamaños no fue significativa.

### 5.3.3.5. Aire intencionalmente incorporado

Es conocido el hecho de que la incorporación intencional de aire mediante la aplicación de aditivos químicos al hormigón, además de producir mejoras en estado fresco debido a una mayor trabajabilidad, incrementa notablemente la durabilidad de la estructura. Por ello son utilizados en obras que puedan estar en contacto con sustancias agresivas y/o sujetas a ciclos de congelamiento y deshielo.

La incorporación de burbujas esféricas de tamaño semi-microscópico uniformemente distribuidas en la matriz, modifica la estructura de poros del hormigón provocando la intersección o corte de los capilares, disminuyendo de este modo el ascenso capilar.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se estudió el comportamiento de hormigones elaborados con aire intencionalmente incorporado a fin de obtener un orden de magnitud de los parámetros de succión capilar. Para ello se elaboró un hormigón convencional identificado como H-28 de razón a/c 0,50, en base al cual se realizó otro hormigón H-29 sobre el que se adicionó un aditivo incorporador de aire (0,05% en peso del cemento), estando este último sujeto a las modificaciones propias que produce en la dosificación dicho agente incorporador (Tabla 5.3).

En la Fig. 5.22 se presentan comparativamente las curvas promedio de absorción capilar en función del tiempo para ambos hormigones evaluados, y en la Tabla 5.19 los respectivos parámetros de ensayo.

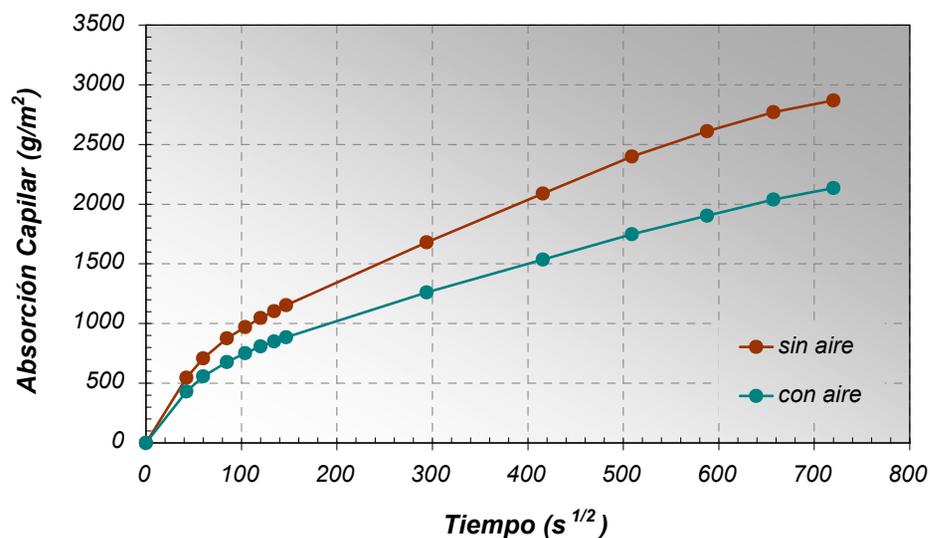


Figura 5.22: Influencia de la incorporación intencional de aire sobre la succión capilar de los hormigones H-28 y H-29.

**Tabla 5.19:** Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-28 y H-29.

<i>Hormigón</i>	<i>Parámetros de succión capilar</i>				
	<i>Velocidad (S)</i>		<i>Capacidad (C)</i>		
	<i>S [g/(m<sup>2</sup>.s<sup>1/2</sup>)]</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>C (g/m<sup>2</sup>)</i>	<i>σ (g/m<sup>2</sup>)</i>	<i>CV</i>
H-28	3,7	0,98	2868	51	1,8
H-29	2,6	0,98	2134	40	1,9

En base a los resultados obtenidos es posible observar que la incorporación de aire, sumado a la consecuente disminución de la razón a/c, produjo reducciones de la capacidad y de la velocidad de succión capilar del 25 y 30%, respectivamente.

Lo anterior se debe al hecho de que la incorporación de burbujas de aire, cuyo diámetro puede alcanzar una magnitud del orden de 1000 veces el diámetro de un poro capilar, produce un cambio brusco en la sección que ocasiona la caída de la presión capilar, disminuyendo de esta manera la absorción.

De este modo, el empleo de un aditivo incorporador de aire en un hormigón convencional de razón a/c 0,50, permitió modificar la dosificación al punto de disminuir la razón a/c a 0,45. Si a esto se le suma la acción del aditivo, se pueden lograr parámetros de transporte capilar del orden de los hallados en hormigones de razón a/c 0,40.

### 5.3.4. Factores relativos al tratamiento de curado

#### 5.3.4.1. Tipo de curado

El adecuado comportamiento en servicio de un hormigón estará condicionado fundamentalmente por dos parámetros estrechamente vinculados: la razón a/c y el tratamiento de curado.

El curado es una operación indispensable y de suma importancia en el desarrollo de las propiedades resistentes y durables del hormigón, mediante el cual se provee un ambiente ideal para el desarrollo de los productos de hidratación del cemento. Del adecuado desarrollo y crecimiento de dichos productos, dependerá la calidad de la estructura porosa y el grado de defensa que presentará ésta ante el ingreso de los agentes externos. Habitualmente, el curado no se realiza en forma correcta y paradójicamente, en muchas circunstancias resulta determinante.

En base a lo anterior, se planteó como objetivo la evaluación de la modificación de la estructura capilar de hormigones de diferentes características tecnológicas, producto de la aplicación de distintos tipos de curados, mediante el ensayo de succión capilar. Ello con el fin de simular diferentes condiciones a las que puede estar sometida una estructura, dependiendo de su ubicación geográfica, de las condiciones ambientales y de la metodología aplicada durante la etapa de curado.

En la Figura 5.23 se presentan las curvas promedio obtenidas en el ensayo de absorción de agua por capilaridad, correspondiente a los hormigones H-8 y H-9 de razón a/c 0,40 y 0,60, respectivamente, elaborados con agregados graníticos y sometidos a tres regímenes de curados detallados en el punto 5.2.3: curado húmedo normalizado (c.h.), estacionamiento en ambiente de laboratorio (lab.) y estacionamiento al exterior (ext.). En la Tabla 5.20 se encuentran los respectivos parámetros junto con los valores estadísticos de dispersión.

De los resultados obtenidos es posible apreciar que tanto la velocidad como la capacidad de succión capilar se ven afectados por el tratamiento de curado. A su vez, para cada hormigón se verifica que ambos parámetros resultaron mayores en el caso del curado a baja humedad relativa (50%), condición que difiere significativamente de la correspondiente al curado húmedo (95%). Como consecuencia de ello, el hormigón resultó con una mayor porosidad capilar debido al déficit de agua necesario para que tengan lugar los procesos de hidratación. Esta

cuestión cobra especial interés en el caso de hormigones ubicados en atmósferas de baja humedad relativa, por ello la importancia de generar un ambiente propicio de humedad y temperatura, sobre todo cuando el hormigonado se lleva a cabo en sitios geográficos con condiciones climáticas adversas. Por ello, este aspecto debería ser contemplado tanto al ensayarse las muestras como al informarse los resultados.

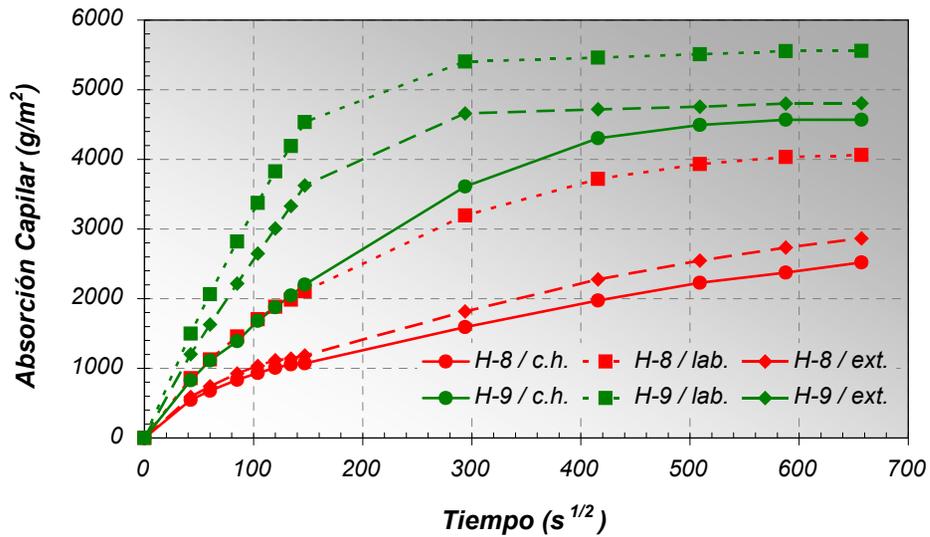


Figura 5.23: Influencia del tipo de curado sobre la succión capilar de los hormigones H-8 y H-9.

Tabla 5.20: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-8 y H-9.

Hormigón	Curado	Parámetros de succión capilar				
		Velocidad (S)		Capacidad (C)		
		$S [g/(m^2 \cdot s^{1/2})]$	$R^2$	$C (g/m^2)$	$\sigma (g/m^2)$	CV
H-8	c.h.	2,8	0,92	2602	250	9,6
	lab.	9,0	0,96	4051	169	4,2
	ext.	3,9	0,98	2971	387	13,0
H-9	c.h.	9,5	0,94	4540	291	6,4
	lab.	28,2	0,94	5460	187	3,4
	ext.	23,1	0,99	4718	278	5,9

Los menores parámetros correspondieron a los hormigones curados en cámara húmeda, mientras que los expuestos al ambiente exterior exhibieron un comportamiento intermedio entre los dos casos anteriores, con una cierta tendencia a aproximarse al comportamiento de los hormigones curados en forma normalizada. Esto último puede explicarse considerando que el ambiente en el cual permanecieron las probetas (atmósfera de la ciudad de La Plata) presenta valores muy elevados de humedad relativa ambiente promedio, próximos al 80%.

Análoga tendencia fue encontrada en los hormigones H-1 y H-2 de razón a/c 0,40 y 0,60, elaborados con agregados cuarcíticos, sometidos a curado en cámara húmeda y en ambiente de laboratorio (Fig. 5.24 y Tabla 5.21).

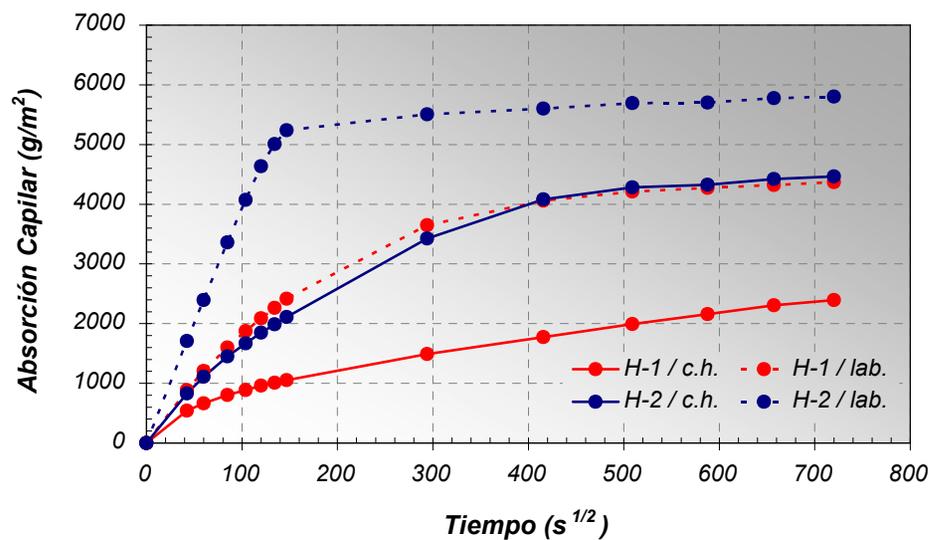


Figura 5.24: Influencia del tipo de curado sobre la succión capilar de los hormigones H-1 y H-2.

Tabla 5.21: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-1 y H-2.

Hormigón	Curado	Parámetros de succión capilar				
		Velocidad (S)		Capacidad (C)		
		$S [g/(m^2 \cdot s^{1/2})]$	$R^2$	$C (g/m^2)$	$\sigma (g/m^2)$	CV
H-1	c.h.	2,6	0,94	2394	191	8,0
	lab.	10,7	0,96	4275	93	2,2
H-2	c.h.	8,8	0,96	4326	84	2,0
	lab.	36,2	0,98	5600	181	3,2

En la Fig. 5.24 puede observarse que la menor absorción corresponde al hormigón de menor razón a/c curado en cámara húmeda (H-1/c.h.), mientras la mayor absorción al hormigón de mayor razón a/c estacionado en ambiente de laboratorio (H-2/lab.).

Cabe destacar el hecho de que hormigones de baja calidad, curados bajo un régimen propicio de humedad y temperatura, exhibieron un comportamiento prácticamente similar a aquellos de menor razón a/c curados en un ambiente desfavorable (ver Tabla 5.21). De aquí se deduce que el empleo de una razón a/c baja es una condición necesaria pero no suficiente para lograr un adecuado comportamiento durable. Este es un claro ejemplo de la importancia que reviste un correcto curado más allá de la dosificación y los materiales empleados, y que los conceptos de resistencia y durabilidad no siempre siguen la misma tendencia.

#### 5.3.4.2. Duración del curado

Otra de las variables estudiadas consistió en la evaluación de la influencia de la duración del curado húmedo, sobre la respuesta de hormigones de diferentes características tecnológicas, frente al transporte de agua por capilaridad. Para ello se trabajó con hormigones de razones a/c 0,40, 0,50 y 0,60 (H-23, H-24 y H-25), curados durante 28 días (c.h.) y 210 días (c.h.p) en cámara húmeda.

En este caso, los ensayos se llevaron a cabo sobre muestras prismáticas de 70 x 100 x 50 mm tomadas de probetas de 70 x 100 x 430 mm, debido a que se realizaron previo a la aprobación de la norma IRAM 1871. El registro del incremento de peso se efectuó a los 30 min y a 1 h, 3 h, 6 h, 24 h, 48 h, y cada 24 h hasta alcanzar la constancia de masa, la cual se asumió adquirida cuando la diferencia entre dos pesadas sucesivas difirió en menos del 0,2%. En algunos casos el registro del incremento de peso se continuó, una vez alcanzada la constancia de masa, al sólo efecto de representar todas las curvas para un mismo tiempo de ensayo.

En la Fig. 5.25 se presentan las curvas de absorción capilar correspondientes a los hormigones estudiados, y en la Tabla 5.22 se exponen los resultados obtenidos correspondientes a la velocidad y capacidad de succión capilar.

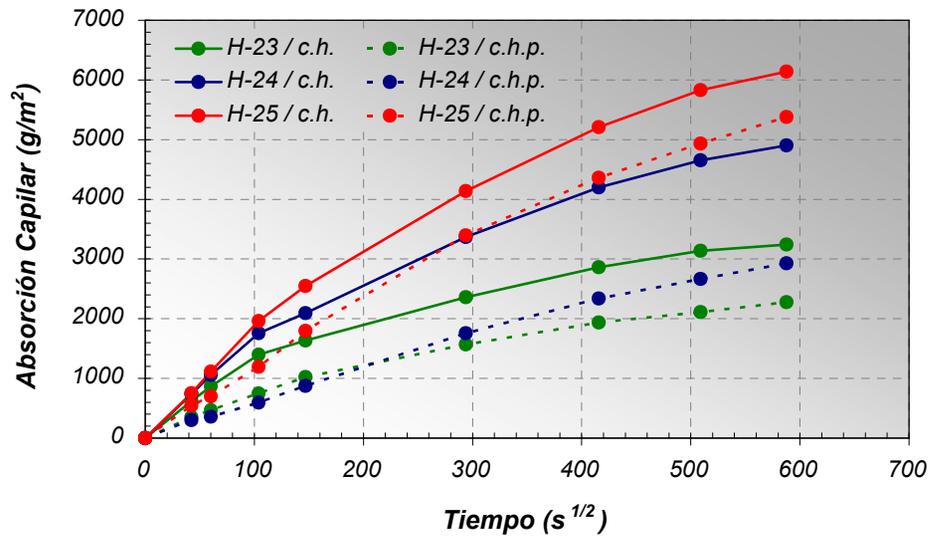


Figura 5.25: Influencia de la duración del curado húmedo sobre la succión capilar de los hormigones H-23, H-24 y H-25.

Tabla 5.22: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-23, H-24 y H-25.

Hormigón	Curado	Parámetros de succión capilar				
		Velocidad (S)		Capacidad (C)		
		$S [g/(m^2 \cdot s^{1/2})]$	$R^2$	$C (g/m^2)$	$\sigma (g/m^2)$	CV
H-23	c.h.	5,8	0,93	3139	132	4,2
	c.h.p.	4,8	0,97	1993	193	9,7
H-24	c.h.	8,9	0,96	4904	263	5,4
	c.h.p.	5,5	0,99	2665	97	3,6
H-25	c.h.	10,7	0,95	6139	420	6,8
	c.h.p.	9,8	0,98	5597	103	1,8

Puede observarse que para igual razón a/c, un mayor tiempo de exposición en ambiente húmedo implica una menor absorción capilar. Esto es debido a que la incidencia de la porosidad capilar en los mecanismos de transporte se atenúa

cuando los procesos de hidratación continúan en el tiempo, consecuencia de la reducción simultánea de la conectividad y del tamaño (radio) de los capilares. El curado húmedo induce por lo tanto a un menor volumen poroso, efecto que se torna más significativo con la duración del mismo.

De la observación de los parámetros de ensayo de la Tabla 5.22 se puede distinguir un comportamiento diferencial dependiendo de la razón a/c del hormigón evaluado. Así, en el caso de los hormigones de razón a/c 0,40, si bien la prolongación del curado húmedo mejora el comportamiento durable, esta mejora no resultó significativa. En estos hormigones, el curado húmedo produce un nivel de desconexión capilar importante a los 28 días, razón por la cual la mejora experimentada luego de 210 días no resultó sustancial.

Por otro lado, en los hormigones de razón a/c 0,60, el volumen de los productos generados durante la hidratación del cemento no es suficiente para lograr un alto nivel de obstrucción capilar, debido a la alta porosidad intrínseca de la matriz. Por ello, la reducción de los parámetros de succión capilar sólo resultó cercana al 10% aproximadamente. Según Neville (1977), para una razón a/c 0,60 es necesario un nivel de hidratación superior al 90% para lograr la desconexión capilar, mientras que para razones a/c superiores a 0,70 ni siquiera una hidratación completa produciría suficiente gel para bloquear los capilares.

Así, la prolongación del curado húmedo resultó más provechosa en los hormigones de razón a/c 0,50, debido a la existencia de un volumen poroso capaz de ser llenado por los productos de hidratación. Es decir, la razón a/c no fue lo suficientemente elevada como para impedir que se alcance un aceptable nivel de segmentación capilar, ni lo suficientemente baja como para experimentar reducciones poco significativas en los parámetros de transporte. En este caso, la extensión del curado húmedo hasta un lapso de 210 días, redujo la velocidad y capacidad de succión capilar un 38 y 46%, respectivamente.

Comparativamente, en hormigones de razones a/c próximas entre sí, el hormigón de mayor razón a/c curado durante 210 días bajo condiciones de humedad y temperatura similares a las correspondientes al curado normalizado, puede presentar similar o mejor comportamiento que el correspondiente al hormigón de menor razón a/c curado en las mismas condiciones, durante un lapso de tiempo de sólo 28 días. Este el caso de los hormigones H-23/c.h. y H-24/c.h.p., y H-24/c.h. y H-25/c.h.p. Si embargo cuando la diferencia entre las razones a/c se acrecienta, dicha relación deja de manifestarse debido a la mayor diferencia entre las porosidades de ambas matrices.

Con respecto a la variabilidad de los parámetros hallados, en la Tabla 5.22 se presentan los estadísticos desviación estándar y coeficiente de variación, para el caso de la capacidad de succión capilar, y el coeficiente de determinación  $R^2$ , obtenido a través del método de mínimos cuadrados, para el caso de la velocidad. Respecto a la capacidad de succión capilar, se observa que conforme aumenta la razón a/c, existe una mayor variabilidad en los datos, lo cual se ve reflejado en los valores del coeficiente de variación y de la desviación estándar. Sin embargo, en el caso del curado prolongado, se observa una tendencia contrapuesta, sumado a ello, la dispersión obtenida en estos últimos hormigones resultó menor que en los curados durante 28 días, fundamentalmente para las razones a/c mayores. Respecto a la velocidad de succión se observa en todos los casos un ajuste aceptable con valores del coeficiente de determinación superiores a 0,90.

### **5.3.5. Factores relativos a las características del hormigón superficial**

#### **5.3.5.1. Aditivo desencofrante**

Los aditivos desencofrantes son desmoldantes líquidos especialmente preparados para impedir la adherencia del hormigón a los encofrados y facilitar su desmolde. Debido a que se trata de un producto de aplicación externa que permanecerá en contacto con la superficie del hormigón durante el curado, es

presumible que dicho producto provoque cierta modificación superficial en la estructura de poros del hormigón en contacto con el molde.

El objetivo del estudio consistió en evaluar el efecto de la aplicación superficial de un aditivo desencofrante sobre moldes de madera, frente a la succión capilar de hormigones de diferentes características tecnológicas.

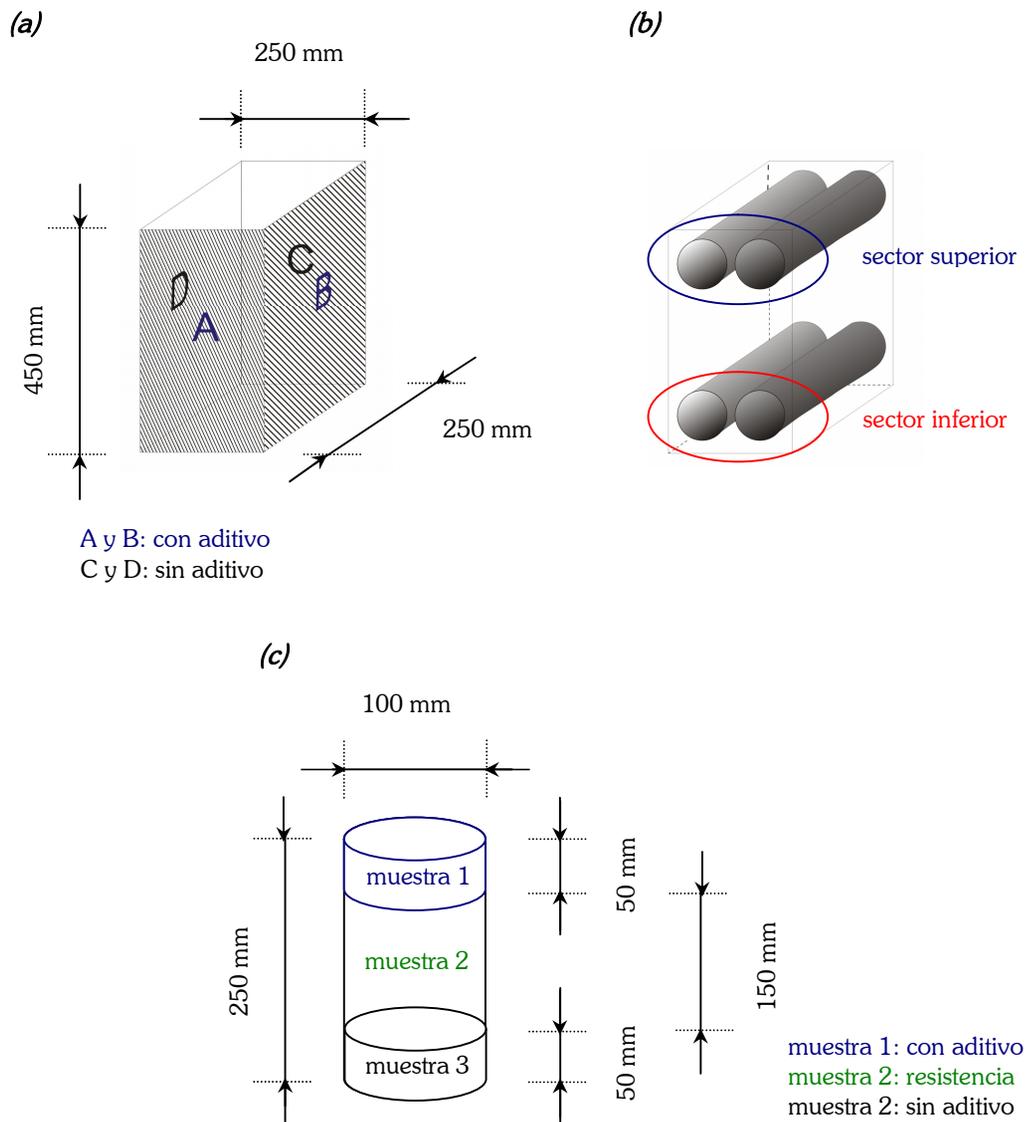
Para llevar a cabo el estudio, se elaboraron hormigones de razón a/c 0,45 y 0,65 (H-30 y H-31), los cuales fueron colocados en encofrados de madera de 250 x 250 x 450 mm. El aditivo fue aplicado unas horas antes del hormigonado, mediante el pincelado sobre la madera limpia y seca de dos lados adyacentes del molde (A y B), mientras que los otros dos lados no recibieron ningún tipo de tratamiento (C y D) (Fig. 5.26a).

Se calaron testigos pasantes de 100 mm de diámetro por 250 mm de longitud en dirección perpendicular al llenado, tanto en el sector superior como en el inferior (Fig. 5.26b). De esta manera se obtuvieron dos muestras para el ensayo de absorción capilar por cada testigo calado, una cuya cara de ensayo se encontró en contacto con la superficie del molde con aditivo (muestra 1) y otra cuya cara resultó adyacente a la cara del molde sin aditivo (muestra 3) (Fig. 5.26c). El sector medio de aproximadamente 150 mm de altura fue destinado al ensayo de resistencia a compresión simple (muestra 2) (Fig. 5.26b).

Los testigos extraídos del sector superior e inferior del elemento posibilitaron evaluar la uniformidad de la mezcla, respecto a su posible exudación y arrastre del producto debido a las operaciones de llenado.

Cabe destacar que estos hormigones fueron estacionados durante 28 días en ambiente de laboratorio sin recibir ningún tratamiento de curado, con el objeto de acentuar la variable a estudiar. Esto fue adoptado en base a lo observado en el punto 5.3.4.1, donde los hormigones estacionados en ambiente de laboratorio

presentaron una matriz más abierta y porosa, lo cual permitiría una penetración mayor del aditivo desencofrante.



**Figura 5.26:** Moldes empleados y calado de testigos: (a) dimensiones del molde e identificación de las caras con y sin aditivo, (b) ubicación de los testigos y (c) identificación de las muestras en el testigo.

En la Fig. 5.27 se presentan las curvas promedio de las muestras adyacentes a la superficie del molde con aditivo (a) y sin aditivo desencofrante (s),

correspondientes al sector superior (sup.) e inferior (inf.) del elemento. En la Tabla 5.23 se exponen los valores obtenidos de los parámetros de succión capilar de los hormigones estudiados.

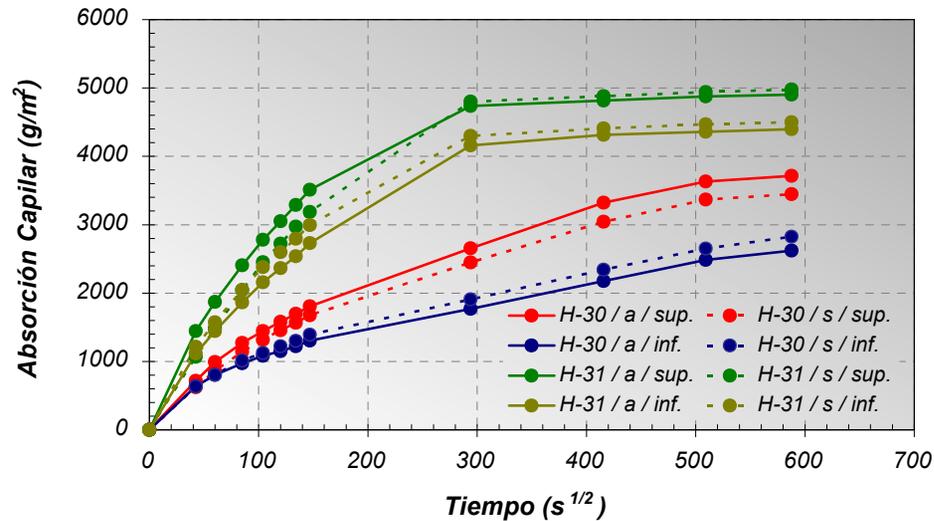


Figura 5.27: Influencia de la aplicación de aditivo desencofrante sobre la succión capilar de los hormigones H-30 y H-31.

Tabla 5.23: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-30 y H-31.

Hormigón	Tratamiento	Ubicación	Parámetros de succión capilar				
			Velocidad (S)		Capacidad (C)		
			$S [g/(m^2 \cdot s^{1/2})]$	$R^2$	$C (g/m^2)$	$\sigma (g/m^2)$	CV
H-30	Con aditivo (a)	sup.	6,4	0,92	3746	44	1,2
		inf.	3,1	0,80	2478	42	1,7
	Sin aditivo (s)	sup.	5,9	0,91	3446	313	9,1
		inf.	4,1	0,95	2929	13	0,5
H-31	Con aditivo (a)	sup.	19,6	0,91	4818	471	9,8
		inf.	15,3	0,95	4334	246	5,7
	Sin aditivo (s)	sup.	20,3	0,99	4880	30	0,6
		inf.	16,9	0,93	4409	30	0,7

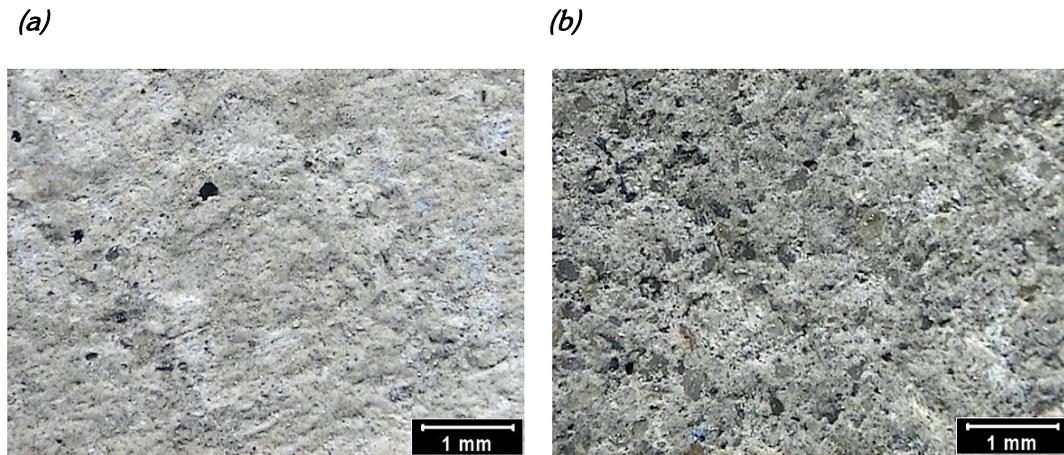
En base a los resultados obtenidos, es posible observar una ligera tendencia a la disminución de los parámetros de succión capilar de aquellos hormigones cuya

superficie de ensayo estuvo en contacto con el molde con aditivo, respecto de aquellos que permanecieron en contacto con el molde seco. Este comportamiento puede ser atribuido al posible sellado de los poros de la superficie expuesta debido al contacto con el producto, lo cual es de especial interés desde el punto de vista durable y en lo que respecta al ingreso de agentes externos a través de la estructura porosa del hormigón de recubrimiento.

Las diferencias halladas en los parámetros de transporte ambos grupos de muestras resultaron poco significativas, al extremo de no observarse mejoras debidas a la aplicación del producto en el caso del hormigón H-30. Cabe aclarar que las muestras tomadas en correspondencia con el sector superior del molde sin aditivo, presentaron una mayor dispersión en los resultados.

Por otro lado, se observó una mayor reducción en los parámetros de transporte debido al contacto con el aditivo, en el caso de las muestras ubicadas en el sector inferior de los encofrados, lo cual puede atribuirse a un efecto de "arrastre superficial" del aditivo consecuencia de las operaciones de llenado.

De la apreciación visual de las muestras de ensayo se observó que el aditivo en contacto con el hormigón generó una superficie de mejor terminación superficial, con un aspecto de textura lisa y de menor porosidad abierta. Lo anterior fue corroborado mediante la observación microscópica de las muestras de hormigón en contacto con el molde con y sin aditivo. En las Figs. 5.28a y 5.28b, se presentan las fotomicrografías de ambos grupos de muestras, ubicadas en el sector superior, correspondientes al hormigón H-31.



**Figura 5.28:** Fotomicrografías del hormigón H-31 correspondientes a muestras en contacto con el molde *(a)* con aditivo y *(b)* sin aditivo.

### 5.3.5.2. Carbonatación

El desencofrado de las estructuras de hormigón armado marca el comienzo de la interacción entre el hormigón y el medio en el cual se halla emplazada la misma. A partir de dicho instante comienzan los procesos de deterioro, estando algunos de ellos relacionados con la corrosión de las armaduras, como es el caso de la carbonatación del hormigón de recubrimiento.

La carbonatación es una reacción físico- química de neutralización de la fase líquida, en la cual el  $\text{CO}_2$  atmosférico reacciona con los productos hidratados de la pasta de cemento (CH y C-S-H) para formar  $\text{CO}_3\text{Ca}$ . La magnitud y velocidad de este fenómeno dependerá fundamentalmente de las características del medio en contacto con la estructura y de la calidad del hormigón de recubrimiento.

Con el fin de estudiar el posible efecto de la carbonatación sobre el transporte capilar, se evaluaron los hormigones H-17 y H-18 de razón a/c 0,45 y 0,65, los que luego de permanecer 28 días con curado húmedo, fueron

estacionados en ambiente de laboratorio (T: 20°C y HR: 50%) durante un período próximo a los 28 meses, a fin de lograr la carbonatación superficial.

Por cada hormigón se establecieron dos grupos, el identificado como (nc), sobre cuyas muestras se extrajo una rodaja de 10 mm de manera tal de eliminar completamente el espesor de hormigón carbonatado, y un segundo grupo identificado como (c) donde el aserrado de la rodaja se efectuó sobre la base de la muestra dejando intacta la cara de ensayo. De esta forma el análisis comparativo se efectuó sobre muestras de la misma edad y de 40 mm de espesor, presentando algunas de ellas su cara de ensayo carbonatada (c) y otras sin carbonatar (nc).

La profundidad de carbonatación medida mediante la técnica colorimétrica con fenolftaleína, evidenció un valor promedio cercano a 4 y 8 mm para los hormigones H-17 y H-18 respectivamente, lo cual fue confirmado luego mediante la observación microscópica.

En las Figs. 5.29a y 5.29b se presentan las fotomicrografías de las muestras carbonatadas (c) correspondientes a los hormigones H-17 y H-18. En el caso del hormigón H-17, el perfil observado revela una carbonatación muy intensa desde la cara exterior hasta aproximadamente 1 mm de profundidad, intensa hasta 2,4 mm y de moderada a leve hasta 3,8 mm, a partir de allí la pasta se halla sana. De diferente disposición aparece el perfil de carbonatación del hormigón H-18, el cual resulta mucho más penetrante, afectado hasta 2,6 mm de profundidad por una carbonatación muy severa. Luego se observa un sector de afectación de intenso a moderado hasta los 4 mm, más allá del cual pueden detectarse sectores localizados levemente carbonatados, aunque la observación microscópica del mosaico correspondiente al espesor total de la muestra, da evidencia de la existencia de pasta sana recién a partir de los 10 mm de profundidad aproximadamente.

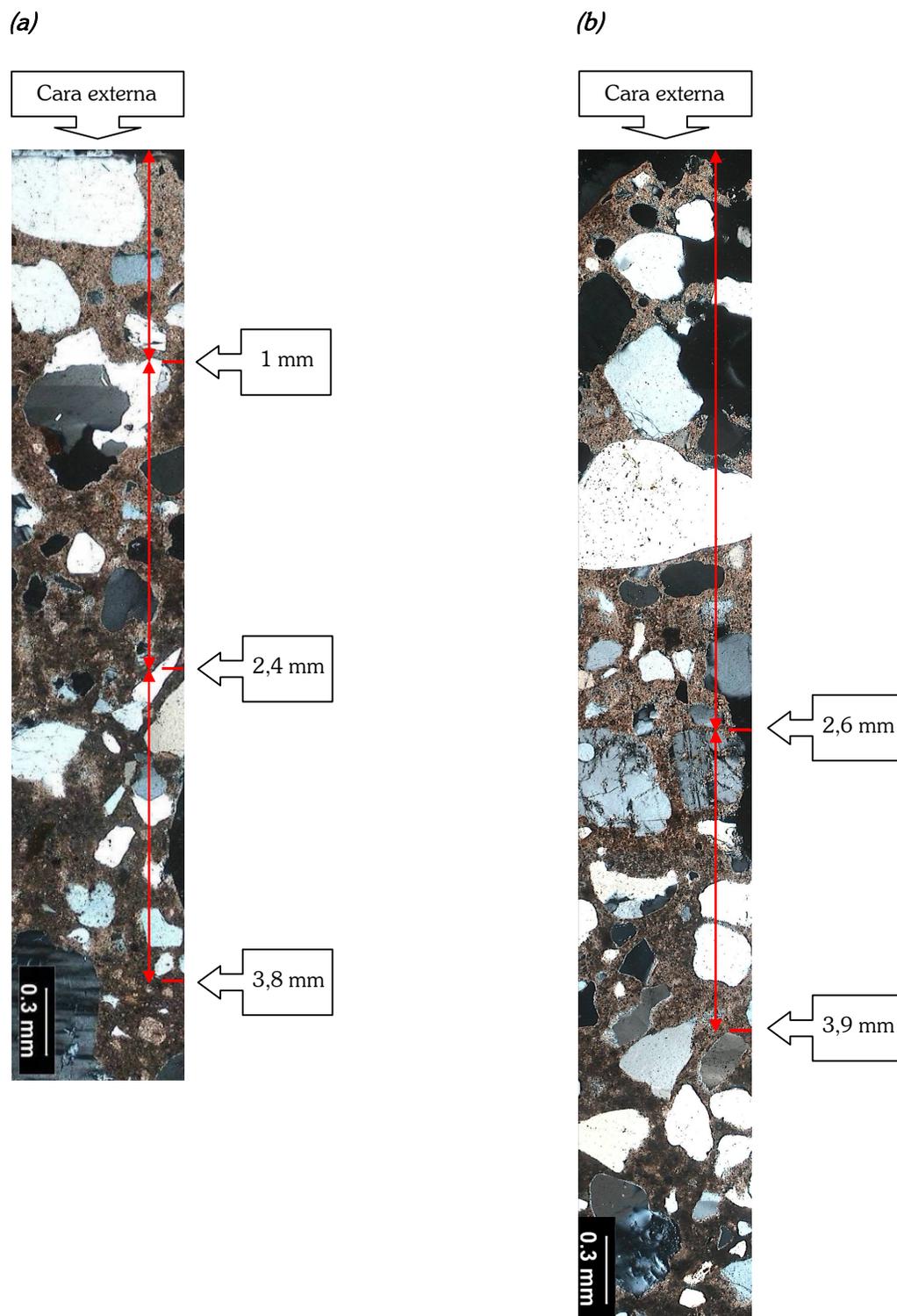


Figura 5.29: Fotomicrografías de muestras carbonatadas del hormigón  
(a) H-17 y (b) H-18.

En la Fig. 5.30 y en la Tabla 5.24 se muestran en forma comparativa los resultados de ensayo de los hormigones evaluados.

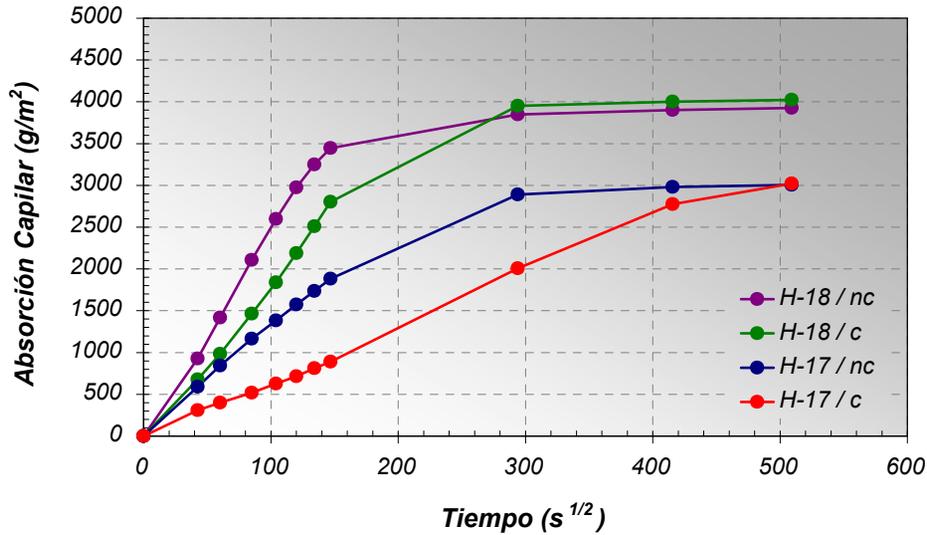


Figura 5.30: Influencia de la carbonatación superficial sobre la succión capilar de muestras de 40 mm de espesor correspondientes a los hormigones H-17 y H-18.

Tabla 5.24: Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-17 y H-18.

Hormigón	Condición	Parámetros de succión capilar				
		Velocidad (S)		Capacidad (C)		
		S [g/(m².s <sup>1/2</sup> )]	R <sup>2</sup>	C (g/m²)	σ (g/m²)	CV
H-17	c	6,8	0,99	3092	40	1,3
	nc	12,3	1,00	2992	76	2,6
H-18	c	20,4	1,00	4002	109	2,7
	nc	24,5	0,99	3901	109	2,8

En base a los resultados obtenidos es posible observar una disminución en la velocidad de succión capilar de los hormigones carbonatados, producto de la reducción del volumen poroso de la matriz por la precipitación de carbonato de calcio en la estructura porosa. Dicha disminución resultó más significativa en el caso de los hormigones de menor razón a/c, ya que para razones a/c más elevadas

la reducción del volumen de poros se ve amortiguada por la elevada porosidad de la matriz. La capacidad de succión capilar se mantuvo prácticamente constante.

Desde el punto de vista durable, si bien la carbonatación atenta contra la corrosión de las armaduras, el depósito de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  resultaría benéfico si se tiene en cuenta que el transporte de sustancias se verá reducido por dicho fenómeno.

Es de destacar por otro lado, que la metodología de cálculo es sensible a la altura de la muestra ensayada, así muestras de menor espesor exhibirán velocidades mayores y capacidades menores de succión capilar, respectivamente.

### 5.3.6. Factores relativos a la metodología de análisis de datos

#### 5.3.6.1. Porcentaje de cálculo

Como ya fuera planteado, la norma IRAM 1871 especifica que durante el secado las muestras deben someterse a  $50^\circ\text{C}$  hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesivas, efectuadas cada 24 h, resulte inferior al 0,1%. Ese mismo porcentaje también es adoptado como límite superior para dar por concluido el ensayo durante las determinaciones experimentales de la masa húmeda.

Durante la redacción de la norma se propusieron en forma aleatoria valores porcentuales tales como 0,1% y 0,2%, tanto para dar por finalizado el secado como para concluir el pesaje húmedo. Con el objeto de analizar la posible variación existente en los parámetros de transporte obtenidos al variar dichos porcentajes, se trabajó con el hormigón H-28 sobre el que se aplicaron dos metodologías de secado. En una de ellas se mantuvo la muestra en estufa durante un tiempo para el cual la diferencia entre pesadas sucesivas resultó inferior al 0,1%, y en la otra el valor límite se adoptó en 0,2%. Adicionalmente para cada metodología de secado, se calcularon los parámetros de transporte tomando como límite superior del pesaje húmedo 0,1 y 0,2% respectivamente. En la Fig. 5.31 se

presentan las curvas de absorción capilar correspondientes al hormigón H-28 y en la Tabla 5.25 se exponen los parámetros obtenidos.

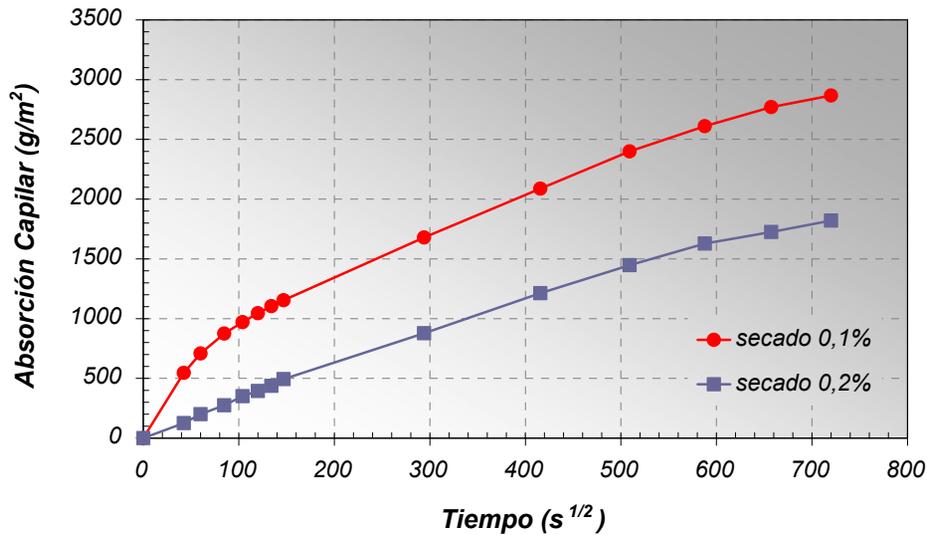


Figura 5.31: Influencia de los porcentajes límites adoptados para el secado y cálculo, sobre la succión capilar del hormigón H-28.

Tabla 5.25: Parámetros succión capilar correspondientes al hormigón H-28.

Porcentaje de secado	Porcentaje de cálculo	Parámetros de succión capilar				
		Velocidad (S)		Capacidad (C)		
		S [g/(m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> )]	R <sup>2</sup>	C (g/m <sup>2</sup> )	σ (g/m <sup>2</sup> )	CV
0,1%	0,1%	3,7	0,98	2868	51	1,8
	0,2%	3,8	0,98	2610	50	1,9
0,2%	0,1%	2,8	0,99	1725	34	2,0
	0,2%	2,8	0,99	1569	124	7,9

Como era de esperar el secado al 0,2% arroja parámetros de transporte de menor magnitud que los obtenidos mediante el secado al 0,1%, consecuencia de un menor tiempo de secado. Sin embargo, es de destacar el hecho de que en el primero de los casos los tiempos de secado se redujeron notablemente.

Por otro lado puede observarse que para un mismo porcentaje de secado, la velocidad de succión capilar resultó similar independientemente del porcentaje adoptado para la finalización del ensayo. Pequeñas diferencias fueron observadas en el caso de la capacidad de succión capilar.

Lo anterior resulta una ventaja interesante, debido a que al no existir diferencias significativas en los parámetros obtenidos al adoptar ambos porcentajes, se puede reducir notablemente el tiempo de ensayo, pues sólo resultaría necesario efectuar tanto el secado como las determinaciones de la masa húmeda, hasta obtener una diferencia menor al 0,2%.

### 5.3.6.2. IRAM / ASTM

Como fuera comentado en el *Capítulo 4*, la norma ASTM C 1585 establece el cálculo de dos parámetros relacionados con la rapidez a la cual el líquido asciende por la estructura capilar del hormigón, las velocidades inicial ( $S_i$ ) y secundaria ( $S_s$ ) de absorción de agua, expresadas ambas en  $\text{mm/s}^{1/2}$ . Por otro lado, la norma IRAM 1871 plantea el cálculo de una única velocidad ( $S$ ) y adiciona el cálculo de la capacidad de succión capilar ( $C$ ), expresadas en  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$  y en  $\text{g}/\text{m}^2$  respectivamente. Las velocidades corresponden a las pendientes de la línea de tendencia de las determinaciones experimentales obtenidas por mínimos cuadrados, según se detalla en la sección 4.2.7.

A fin de analizar comparativamente los parámetros de ensayo obtenidos según la metodología particular dispuesta por cada normativa, se evaluaron muestras de los hormigones H-28 y H-29 según las dos técnicas. En las Figs. 5.32 y 5.33 se presentan gráficamente los resultados obtenidos según las normas IRAM 1871 y ASTM C 1585, respectivamente y en la Tabla 5.26 se exponen las magnitudes de los parámetros de succión capilar. En el caso de las velocidades inicial ( $S_i$ ) y secundaria ( $S_s$ ) entre paréntesis aparecen las magnitudes expresadas  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ , de manera tal de facilitar la comparación con la velocidad de succión

capilar ( $S$ ) obtenida según la norma IRAM 1871. En la misma Tabla se halla como parámetro estadístico de las velocidades de absorción de agua el coeficiente de correlación  $r$ , según lo plantea la norma ASTM C 1585.

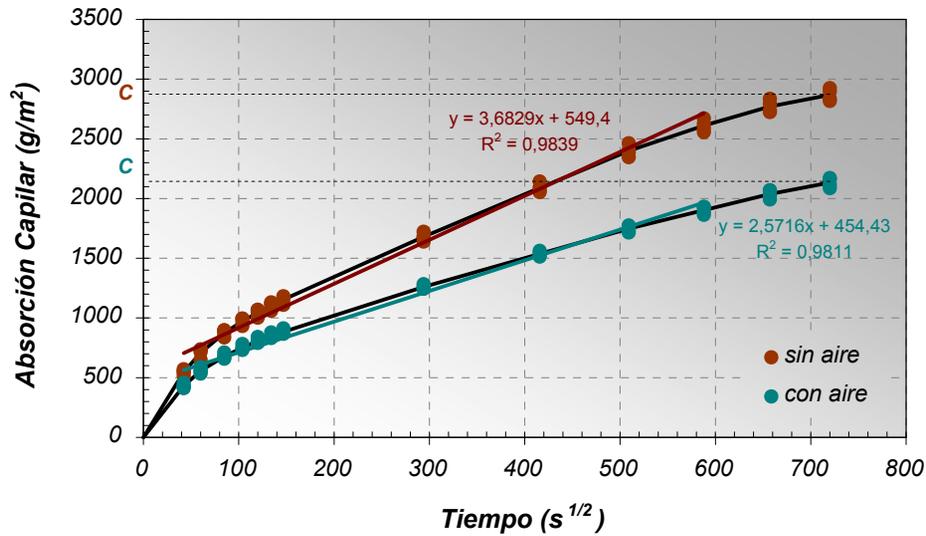


Figura 5.32: Determinación de los parámetros de succión capilar de los hormigones H-28 y H-29 según norma IRAM 1871.

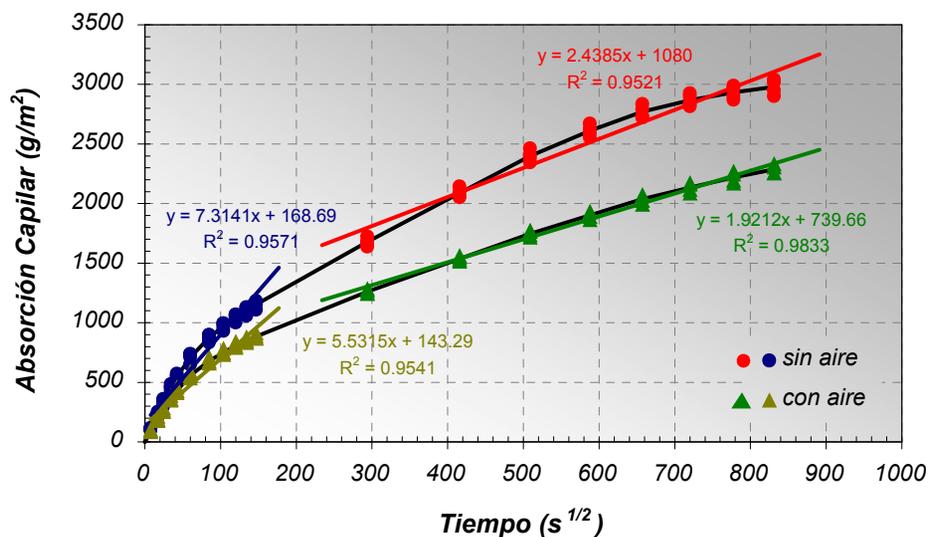


Figura 5.33: Determinación de las velocidades de absorción capilar de los hormigones H-28 y H-29 según norma ASTM C 1585.

**Tabla 5.26:** Parámetros de succión capilar correspondientes a los hormigones H-28 y H-29, según normas IRAM 1871 y ASTM C 1585.

Hormigón	Parámetros de succión capilar								
	IRAM 1871					ASTM C 1585			
	Velocidad (S)		Capacidad (C)			Vel. Inicial (S <sub>i</sub> )		Vel. Secundaria (S <sub>s</sub> )	
	[g/(m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> )]	R <sup>2</sup>	(g/m <sup>2</sup> )	σ (g/m <sup>2</sup> )	CV	(mm/s <sup>1/2</sup> )	r	(mm/s <sup>1/2</sup> )	r
H-28	3,7	0,98	2868	51	1,8	0,0073(7,3)	0,98	0,0024(2,4)	0,98
H-29	2,6	0,98	2134	40	1,9	0,0055(5,5)	0,98	0,0019(1,9)	0,98

En base a las dos metodologías evaluadas es posible observar, teniendo en cuenta los valores estadísticos hallados, que ambas técnicas permiten describir el fenómeno en forma aceptable.

La interpretación de los parámetros hallados según la norma ASTM C 1585 permite apreciar que en los hormigones sin aire intencionalmente incorporado (H-28), la velocidad a la cual se produce el ascenso capilar supera a la correspondiente a los hormigones con aire incorporado (H-29) en los dos estadios analizados. Es decir que su análisis "sectorizado" permite una descripción discreta del fenómeno evaluado. Sin embargo, no es posible deducir la cantidad de agua absorbida por la muestra, de la sólo interpretación de dichos parámetros.

El análisis de los resultados mediante los parámetros obtenidos a través de la norma IRAM 1871 permite cuantificar a través de un valor único la velocidad de penetración del líquido por capilaridad, independientemente del período analizado. Por otro lado, otorga una magnitud de la cantidad de agua capaz de ser retenida por la muestra.

En el caso de los hormigones evaluados, los patrones elaborados sin aire intencionalmente incorporado evidenciaron mayores parámetros de succión que aquellos elaborados con aire incorporado. Sin embargo podría presentarse algún caso (como alguno de los analizados en ítems anteriores) que presentando mayor

velocidad se evidencie una menor capacidad y viceversa, de allí la ventaja del cálculo de la capacidad de succión capilar, además de la velocidad, como parámetro característico del movimiento de agua por capilaridad.

# Capítulo 6

---

*Conclusiones*

## 6.1. Conclusiones

El método gravimétrico directo empleado en la evaluación de la succión capilar en hormigones, es una técnica muy sensible a las variaciones en las condiciones de ensayo y en las características composicionales del hormigón estudiado. Debido a ello, es necesario tener pleno conocimiento de los factores que afectan las determinaciones experimentales, a fin de realizar una correcta interpretación de los resultados. Este hecho ha llevado a que en este trabajo de Tesis se evalúen distintas variables que pueden conducir, si no se tienen en cuenta, a la obtención de resultados o interpretaciones erróneas respecto a la calidad de hormigones de diferentes características tecnológicas. A continuación se presentan las conclusiones obtenidas.

### 6.1.1. Tratamiento de curado

*De todos los factores analizados el curado es el que resulta ser el más sensible frente al transporte de agua por capilaridad.*

- Los menores parámetros de succión capilar se logran en hormigones curados con una humedad relativa ambiente elevada, mientras que si se estacionan en ambientes de baja humedad relativa, cercana al 50%, los parámetros se incrementan considerablemente.
  
- La prolongación del curado húmedo de 28 a 210 días produce pequeñas mejoras en hormigones de razón a/c 0,40 y 0,60, resultando más provechosa en hormigones de razón a/c 0,50. En este último caso, el nivel relativo de desconexión capilar supera al correspondiente a los hormigones de razón a/c 0,40 y 0,60. Esto puede conducir a que dicho hormigón exhiba un comportamiento similar al de un hormigón de razón a/c 0,40 curado en las mismas condiciones durante un lapso de tiempo de sólo 28 días.

### 6.1.2. Características tecnológicas del hormigón

- **Razón a/c**

*La razón a/c es otro factor de suma importancia que influye sobre la determinación de la succión capilar, aunque ésta se halla íntimamente relacionada con el tipo de curado.*

Los parámetros obtenidos en el ensayo de succión capilar aumentan conforme se incrementa la razón a/c, independientemente del tipo de agregado empleado, consecuencia de una estructura capilar más abierta y de menor tortuosidad.

- **Tipo de cemento**

*El tipo de cemento modifica la respuesta del hormigón frente al transporte de agua por capilaridad debido fundamentalmente a las variaciones en su composición.*

- Un hormigón de razón a/c 0,50 elaborado con cemento CAH 40 presenta mejor comportamiento que otro elaborado con cemento del tipo CPC 40. Esto se atribuye a su mayor finura y a la mayor tortuosidad y refinamiento de los poros como consecuencia de las propiedades puzolánicas y cementantes de las escorias. En el caso del cemento CPC 40 si bien el filler contribuye a una mejor hidratación, su reemplazo por cemento produce hormigones más porosos, hecho que se acentúa ante condiciones de curado desfavorables. Los hormigones elaborados con cemento CPN 40 presentan un comportamiento intermedio, dado que la hidratación del cemento está determinada sólo por la formación de C-S-H.

Es preciso considerar el hecho de que la velocidad de succión capilar obtenida en hormigones de razón a/c 0,50, elaborados con cementos CPC 40, resulta próxima al límite máximo admisible de  $4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$  establecido en el Proyecto de Reglamento CIRSOC 201: 2005. Dicho límite

podría ser superado en el caso de razones a/c iguales o mayores a la evaluada, o bien ante condiciones de curado deficientes.

▪ **Tipo de agregado grueso**

*Las propiedades físicas del agregado grueso tales como su absorción y textura, también producen modificaciones en las determinaciones de la succión capilar.*

- En hormigones de razón a/c 0,45, elaborados con piedra cuarcítica, la elevada absorción del agregado grueso genera velocidades de succión iguales al límite establecido en el Proyecto de Reglamento CIRSOC 201: 2005. Los hormigones elaborados con piedra partida granítica y basáltica presentan mejor desempeño que los elaborados con canto rodado silíceo, debido a la textura rugosa del agregado que produce un mejoramiento de la interfase.

Por otro lado, la calidad de la matriz limita la intervención de los agregados en el transporte capilar, por lo cual en matrices cerradas la colaboración del agregado en el transporte capilar es menor. Este comportamiento se verifica también en el caso de hormigones elaborados con agregados reciclados. Estos últimos además, por su composición y elevada absorción, conducen a incrementos considerables de los parámetros de succión, debido a la presencia de restos de matriz del hormigón original del cual fue obtenido.

Un pequeño incremento en el tamaño máximo del agregado grueso sólo produce leves aumentos de los parámetros de transporte, en el caso de hormigones de baja razón a/c. Para razones a/c del orden de 0,60 no es posible obtener una tendencia clara, hecho atribuido a la calidad de la matriz.

▪ **Aditivo incorporador de aire**

- El empleo de aditivo incorporador de aire en un hormigón de razón a/c 0,50 reduce tanto la velocidad como la capacidad de succión capilar entre el 25 y el 30%, permitiendo obtener parámetros de succión del orden de los obtenidos en hormigones de razón a/c 0,40. Este hecho es consecuencia directa de dos efectos simultáneos: la disminución de la razón a/c provocada en la dosificación por la incorporación del aditivo y la modificación de la estructura de poros del hormigón por la intersección o corte de los capilares.

**6.1.3. Características del hormigón superficial**

- El empleo de aditivos desencofrantes sobre moldes de madera provoca una mejora en la terminación y textura de la superficie externa, lo cual redundaría en una leve disminución de la porosidad abierta que reduce ligeramente la velocidad y la capacidad de succión capilar.
- La carbonatación del hormigón superficial tiene cierto efecto benéfico desde el punto de vista del transporte capilar, ya que ocasiona una reducción de la velocidad de succión por la precipitación de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  en la estructura porosa. Este efecto resulta más significativo en el caso de hormigones de baja razón a/c, donde el volumen relativo de poros resulta menor.

**6.1.4. Metodología de ensayo**

- Respecto a la profundidad a la cual debe sumergirse la muestra, las variaciones de nivel dentro del rango establecido por la norma IRAM 1871 no modifican los resultados obtenidos. Sin embargo, se recomienda no exceder el límite máximo para evitar resultados erróneos.

- El control de la temperatura de secado durante el pre-acondicionamiento de las muestras es otra variable de suma relevancia. Si bien la norma IRAM 1871 establece que el secado deberá realizarse a  $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , cualquier variación efectuada afectará considerablemente los resultados obtenidos. El incremento en la temperatura de secado de 50 a  $75^{\circ}\text{C}$  produce aumentos sustanciales en los parámetros de succión capilar, resultando sensiblemente más afectado el hormigón de mayor calidad debido a una mayor proporción relativa del agua evaporable.

#### 6.1.5. Características de la muestra

- La velocidad y capacidad de succión capilar presentan una dependencia directa con el perímetro de la muestra e indirecta con la forma y el área de la sección transversal. Debe considerarse que al ensayar muestras que difieren de las cilíndricas de 100 mm de diámetro, se estaría sobreestimando la calidad del hormigón evaluado.

Por otro lado, las muestras extraídas del sector superior en probetas de 200 mm de altura, evidencian pequeños incrementos en los parámetros de succión capilar, respecto de los obtenidos en muestras ubicadas en cualquier otro sector. Ello se debe al asentamiento preferencial de los componentes más pesados y al aumento progresivo en la proporción de mortero y en la razón a/c, conforme la muestra es tomada a mayor altura.

Los parámetros de transporte obtenidos en muestras extraídas de probetas moldeadas resultan levemente superiores a los obtenidos en el caso de testigos calados, debido a la existencia de un “efecto de molde” que origina una zona de menor calidad próxima a las paredes del mismo, el cual no se verifica en el caso de testigos.

### 6.1.6. Metodología de análisis de datos

- El secado de las muestras hasta obtener una constancia de masa correspondiente al 0,2% permite reducir el tiempo de secado respecto del efectuado al 0,1%, pero se obtienen parámetros de transporte de menor magnitud. Respecto a las determinaciones de la masa húmeda, prácticamente no existen diferencias en los valores hallados cuando se considera como límite porcentual 0,1 o 0,2%. Esto constituye una ventaja importante al permitir reducir considerablemente el tiempo de ensayo.

Finalmente como conclusión general, puede afirmarse que mediante la metodología de ensayo estudiada pueden obtenerse parámetros confiables de caracterización de la calidad de un hormigón desde el punto de vista durable, siempre y cuando se contemplen los factores anteriormente analizados. De las variables tecnológicas estudiadas el tratamiento de curado constituye el factor más relevante, también la razón a/c, aunque se trata de una condición necesaria pero no suficiente para asegurar un buen comportamiento. Respecto a la técnica de ensayo, el pre-acondicionamiento resulta primordial para definir adecuadamente el estado de humedad inicial de las muestras, del cual dependen los parámetros obtenidos.

### 6.2. Estudios futuros

A partir de los resultados obtenidos en esta Tesis surgen como estudios futuros el análisis del transporte de agua por capilaridad de hormigones elaborados con distintos tipos de adiciones, en proporciones conocidas, de manera tal de individualizar las modificaciones producidas por cada adición sobre la estructura porosa de la matriz.

Por otro lado, debido a que en la actualidad el diseño por durabilidad de las estructuras de hormigón armado plantea la cuantificación de distintos mecanismos

de transporte, surge la necesidad de estudiar la posible correlación existente entre el método de laboratorio de evaluación de la succión capilar y otras técnicas de ensayo capaces de caracterizar propiedades tales como difusión de cloruros, permeabilidad al aire mediante métodos superficiales e intrusivos y permeabilidad al agua, entre otros. Este hecho permitiría estimar la calidad de un hormigón ante los distintos mecanismos de transporte que pueden producirse para las condiciones específicas de emplazamiento de la estructura.

# Capítulo 7

---

---

*Referencias*

### 7.1. Referências

- 1- ABNT: NBR 9779: 1995. “Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção da água por capilaridade”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, Brasil.
- 2- ACI 318-05 / 318R-05, Building Code Requirements for Structural Concretes and Commentary, ACI Committee 318, American Concrete Institute, Manual of Concrete Practice, Farmington Hills, Estados Unidos, 2005.
- 3- ASTM C 1585-04. “Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concrete”. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, 2004. ASTM International, West Conshonocken, PA, USA.
- 4- ASTM C 642-97. “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete”. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, 2004. ASTM International, West Conshonocken, PA, USA.
- 5- ASTM Standard C 192/C 192M-02, “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimen in the Laboratory,” Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, 2004. ASTM International, West Conshonocken, PA.
- 6- Bardella, P. S., Barbosa D. C., Camarini G., “Influência da sílica ativa e das condições de cura na absorção capilar e na permeabilidade ao ar do concreto”. 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Jacinto, E. P. G. A., Monteiro E., Bittencourt, T. N. IBRACON, Setembro 2005. Olinda. P.E., Brazil, pp. 243-252.
- 7- Basheer, P. A. M., "Permeation Analysis" en "Handbook of analytical techniques in concrete science and technology. Principles, Techniques and Applications". ISBN 0-8155-1437-9. Ramachandran, V. S., Beaudoin, J. J. Noyes Publications. New Jersey, U.S.A. 2001.
- 8- BS 1881-122: 1983. “Method for Determination of Water Absorption”. British Standards Institution, Testing Concrete, London.

- 9- Buyle-Bodin F., Hadjieva-Zaharieva, R. 2002. "Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete". *Materials and Structures*, 35, (252), (2002), pp. 504-509.
- 10-Camarini, G., Balayssac, J. P., Detriché Ch. H., "Influence of Cement Type and Curing Conditions on Initial Absorption of Concrete". *Second CANMET / ACI International Conference*. Gramado, Brazil. 1999, pp. 427-443.
- 11-Cantarelli, G. M., Isaía, G., Gastaldini, L., Ternus, C., "Estudo da absorção capilar da camada de cobrimento em protótipos de concreto com elevados teores de escória e cinza volante". *47º Congresso Brasileiro do Concreto*. Jacinto, E. P. G. A., Monteiro E., Bittencourt, T. N. IBRACON, Setembro 2005. Olinda. P.E., Brazil, pp. 243-252.
- 12-CIRSOC 201: 2005. "Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón", INTI, Buenos Aires, Argentina, 2005, 452 p. (en etapa de aprobación).
- 13-Código Modelo CEB-FIB 1990 para Hormigón Estructural, Comité Euro-Internacional del Hormigón, 1990, 570 p.
- 14-CYTED, "Descripción de Métodos de ensayo" en "DURAR, Red Temática XV.B. Durabilidad de la Armadura. Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado". ISBN 980-296-541-3. Troncónis de Rincón, O., Romero de Carruyo, A., Andrade C., Helene, P., Díaz I. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Subprograma XV Corrosión / Impacto Ambiental sobre Materiales. Río de Janeiro, Brasil. 1997.
- 15-Dhir, R. K., Hewlett, P. C., Chan, Y. N., "Near – surface characteristics of concrete: assessment and development of in situ test methods". *Magazine of Concrete Research*, 39 (141), (1987), pp. 183-195.
- 16-Dias, W. P. S., "Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation". *Cement and Concrete Research*, 30 (8), (2000), pp. 1255-1261.
- 17-DIN 52617: 1987. "Determination of the water absorption coefficient of building materials", Deutsches Institut fur Normung, Berlin, Germany.

- 18-Di Maio, A. A., Zega, C. J., Traversa, L.P. "Estimation of Compressive Strength of Recycled Concretes with the Ultrasonic Method". *Journal of ASTM International*, 2 (5), (2005). Available online at [www.astm.org](http://www.astm.org).
- 19-Eperjesi, L., Ferreyra Hirsch, E., Saralegui, G., Giovambattista, A., "Influencia de las adiciones activas en la calidad del hormigón superficial". 1er Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón. AATH, Junio 1998. Buenos Aires, Argentina, pp. 243-252.
- 20-Fagerlund, G., "On the capillarity of Concrete", Publication N° 1. Nordic Concrete Research. The Nordic Concrete Federation. Oslo, December 1982, 20 p.
- 21-Feldman, R. F., Sereda, P. J., "A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties". *RILEM Bulletin*, 1 (6), (1968) pp. 509-520.
- 22-Figg, J. W., "Methods of Measuring the Air and Water Permeability of Concrete". *Magazine of Concrete Research*, 25 (85), (1973), pp. 213-219.
- 23-Golapan, M. K., "Sorptivity of fly ash concretes". *Cement and Concrete Research*, 26 (8), (1996), pp. 1189-1197.
- 24-González, L., Menéndez, G., Irassar, E. F., "Evaluación de la absorción capilar en distintos hormigones expuestos al medio ambiente". 15ª Reunión Técnica "Ing. Marcelo Wainsztein", Seminario de Hormigones Especiales. AATH, Octubre 2003. Santa Fe, Argentina. Editado en CD.
- 25-Hall, C., "Water sorptivity of mortars and concretes: a review". *Magazine of Concrete Research*", 41 (147), (1989), pp. 51-61.
- 26-Hall, C., Hoff, W. D., "Water transport in brick, stone and concrete". ISBN 0-419-22890-X. Taylor & Francis. Oxon OX14 4RN, United Kingdom. 2002.
- 27-Hall, C., Yau, M. H. R., "Water Movement in Porous Building Materials – IX. The Water Absorption and Sorptivity of Concretes". *Building and Environment*, 22 (1), (1987), pp. 77-82.

- 28-Hansen, T. C., "Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-art-report developments 1945-1985". RILEM Technical Committee 37-DRC, Materials and Structures, 19 (111), (1986), pp. 201-246.
- 29-Hansen, T. C., Narud, H. 1983. "Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate". Concrete International, 5 (1), (1983), pp. 79-83.
- 30-Hanžič, L., Ilić, R., "Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete". Cement and Concrete Research, 33 (9), (2003), pp. 1385-1388.
- 31-IRAM 1534: 2004. "Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- 32-IRAM 1536:1978. "Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- 33-IRAM 1546:1992. "Hormigón de cemento pórtland. Método de ensayo de compresión", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- 34-IRAM 1562:1978. "Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de determinación de la densidad, el rendimiento y el contenido de aire", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- 35-IRAM 1602-1: 1988. "Hormigón de cemento pórtland. Método por presión para la determinación del contenido de aire en mezclas frescas de hormigones y morteros - Método A", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- 36-IRAM 1871:2004. "Método para la determinación de la capacidad y velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.

- 37-IRAM 50000:2000. "Cemento. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- 38-IRAM 50001:2000. "Cemento. Cementos con propiedades especiales", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- 39-Khatib, J. M., Mangat, P. S., "Absorption characteristics of concrete as a function of location relative to casting position". *Cement and Concrete Research*, 25 (5), (1995), pp. 999-1010.
- 40-Kockal, N. U., Turker, F., "Effect of environmental conditions on the properties of concretes with different cement types". *Constructions and Building Materials*, 21 (2007) pp. 634-645.
- 41-Kolias, S., Gergiou, C., "The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete". *Cement and Concrete Composite*, 27 (2), (2005) pp. 211-216.
- 42-LNEC E-393: 1993. "Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade". Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 1993, 2p.
- 43-Long, A. E., Henderson, G. D., Montgomery, F. R., "Why Assess the Properties of Near-Surface Concrete?" en "Near-Surface Testing for Strength and Durability of Concrete". Basheer, P. A. M. Proc. V CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. Barcelona, España. 2000.
- 44-Martys, N. S., Ferraris C. F., "Capillary transport in mortars and concrete". *Cement and Concrete Research*, 27 (5), (1997), pp. 747-760.
- 45-Mc Carter, W. J., Ezirim, H., Emerson M., "Properties of concrete in the cover zone: water penetration, sorptivity and ionic ingress". *Magazine of Concrete Research*, 48 (176), (1996), pp. 149-156.
- 46-Mehta, K., Monteiro, P. J. M., "Concreto. Estructuras, propiedades y materiales". ISBN 968-464-083-8. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. 1998.

- 47-Menéndez, G., Bonavetti, V. L., Irassar, E. F., "Absorción capilar en hormigones con cemento compuesto". *Hormigón*, AATH, 38, (2002), pp. 25-34.
- 48-Meyer, A., "The Importance of the Surface Layer for the Durability of Concrete Structures". SP 100, Katharine and Bryant Mather International Conference, Concrete Durability. ACI, 1987, pp. 49-61.
- 49-Mindess, S., Young, J. F., "Concrete". ISBN 0-13-167106-5. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey. 1981.
- 50-NBN B15-217: 1984. "Essais des Betons. Absorption d'eau par capillarite", Institut Belge de Normalisation, Brucella, Belgique.
- 51-Neville, A. M., "Tecnología del Concreto". Tomo I. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. 1977.
- 52-Neville, A. M., "Tecnología del Concreto". Tomo II. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. 1977.
- 53-Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H., Kou, S. C. "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete". *Cement and Concrete Research*, 34 (1), (2004), pp. 31-36.
- 54-Reda Taha, M. M., El-Dieb, A. S., Shrive, N. G., "Sorptivity: a Reliable Measurement for Surface Absorption of Masonry Brick Units." *Materials and Structures*, 34 (7), (2001), pp. 438-445.
- 55-RILEM TC 116-PCD: "Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability", *Materials and Structures*, 32 (217), (1999), pp. 174-179.
- 56-Sabir, B.B., Wild, S., O'Farrell, M., "A Water Sorptivity Test for Mortar and Concrete". *Materials and Structures*, 31 (8), (1998), pp. 568-574.
- 57-SIA 162/1 Test N° 5: "Water Conductivity, Guidelines for testing". Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research. 1989, (traducción al castellano).

- 58-Sosoro, M., "Transport of organic fluids through concrete". *Materials and Structures*, 31 (207), (1998), pp. 162-169.
- 59-Tasdemir, C., "Combined effect of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete". *Cement and Concrete Research*, 33 (10), (2003), pp. 1637-1642.
- 60-Taylor, S. C., Hoff, M. A., Wilson, K. M. and Green, K. M. "Anomalous water transport properties of Portland and blended cement-based materials". *Journal of Materials Science Letters*, 18 (23), (1999), pp. 1925-1927.
- 61-UNE-EN 772-11: 2001. "Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11: Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería, en hormigón, piedra natural y artificial, y de la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fabricación de albañilería". AENOR 2001. Madrid, España.
- 62-Wirquin, E., Hadjieva-Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., "Utilisation de L'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité – Application aux bétons de granulats recyclés". *Materials and Structures*, 33 (6), (2000), pp. 403-408.
- 63-Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Wirquin, E., "Frost resistance of recycled aggregate concrete". *Cement and Concrete Research*, 34 (10), (2004), pp. 1927-1932.
- 64-Zega, C. J., Di Maio, A. A. "Efecto del Agregado Reciclado sobre las Propiedades del Hormigón". *Boletín Técnico del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales. IMME, UCV*, 45 (2), (2007), pp. 1-11.